

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
PARAÍBA *CAMPUS* PATOS
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ANGELINA ERYKA FERNANDES ARCOVERDE

**DISPOSITIVOS DE RESFRIAMENTO PASSIVO TIPO ECO-COOLER: REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E
DESEMPENHO TÉRMICO E AERODINÂMICO**

**PATOS – PB
2026**

ANGELINA ERYKA FERNANDES ARCOVERDE

**DISPOSITIVOS DE RESFRIAMENTO PASSIVO TIPO ECO-COOLER: REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E
DESEMPENHO TÉRMICO E AERODINÂMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
– *Campus* Patos, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Profa. Ma. Larissa Layerr
Oliveira de Medeiros e Lima

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CAMPUS PATOS/IFPB

A675d Arcoverde, Angelina Eryka Fernandes.

Dispositivos de resfriamento passivo tipo eco-cooler: revisão sistemática da literatura sobre parâmetros geométricos e desempenho térmico e aerodinâmico / Angelina Eryka Fernandes Arcoverde. - Patos, 2026.

57 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil.)-Instituto Federal do Sertão da Paraíba, Campus Patos-PB, 2026.

Orientador(a): Profa. Ma. Larissa Layerr Oliveira de Medeiros e Lima

1. Eco-cooler-Resfriamento passivo 2. Mecânica dos fluidos 3. Conforto térmico I. Título II. Lima, Larissa Layerr Oliveira de Medeiros e III. Instituto Federal do Sertão da Paraíba.

CDU – 532

ANGELINA ERYKA FERNANDES ARCOVERDE

**DISPOSITIVOS DE RESFRIAMENTO PASSIVO TIPO ECO-COOLER: REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E
DESEMPENHO TÉRMICO E AERODINÂMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
– *Campus* Patos, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Civil.

APROVADO EM: ____/____/2026

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ma. Larissa Layerr Oliveira de Medeiros e Lima.
Orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Profa. Ma. Ana Letícia Ramos Bezerra - Examinadora
Centro Universitário de Patos (UNIFIP)

Prof. Me. Adri Duarte Lucena - Examinador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Aos meus pais, por não economizarem nas
orações que me fizeram florescer e colher os
sonhos que agora posso realizar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter guiado meus passos, concedido sabedoria, força e perseverança ao longo de toda esta caminhada. Sem Sua graça, a conclusão desta etapa não seria possível.

À minha família, pelo amor incondicional, incentivo, compreensão e apoio em todos os momentos, especialmente diante dos desafios enfrentados durante esta trajetória acadêmica. Cada conquista também pertence a vocês.

À minha orientadora, Profa. Ma. Larissa Layerr Oliveira de Medeiros e Lima, pela dedicação, disponibilidade e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por compartilhar seu conhecimento com tanta excelência, tornando o processo da graduação mais enriquecedor e motivador. Sua competência, profissionalismo e compromisso com a formação de seus alunos fazem dela uma verdadeira inspiração para todos nós, exemplo que levarei para minha vida acadêmica e profissional.

A todos os professores e servidores do Instituto Federal da Paraíba - *Campus Patos*, que fizeram parte da minha formação, pelos ensinamentos, incentivo e conhecimentos compartilhados, contribuindo significativamente para minha formação profissional e pessoal.

Aos colegas e amigos que estiveram presentes durante esta caminhada, pelo companheirismo, apoio e pelos momentos compartilhados, tornando essa jornada mais leve e enriquecedora.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha graduação e para a conclusão desta importante etapa da minha vida.

Muito obrigada.

RESUMO

O aumento das temperaturas em regiões semiáridas e a limitação de acesso a sistemas convencionais de climatização evidenciam a necessidade de estratégias passivas de resfriamento capazes de proporcionar conforto térmico com baixo consumo energético. Nesse contexto, os dispositivos do tipo Eco-cooler destacam-se como uma alternativa de baixo custo baseada nos princípios da Equação da Continuidade, da Equação de Bernoulli e do efeito Venturi. Este estudo teve como objetivo identificar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, os principais parâmetros geométricos investigados em dispositivos de resfriamento passivo do tipo Eco-cooler e analisar sua influência sobre o desempenho térmico e aerodinâmico. A pesquisa foi conduzida conforme as recomendações do protocolo PRISMA, mediante buscas nas bases Google Scholar, Scopus, Web of Science, SciELO e Portal de Periódicos CAPES, complementadas pela técnica de *snowballing*. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 12 estudos publicados entre 2018 e 2024 para análise. Os resultados evidenciaram que a razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída, a geometria dos bocais, o ângulo de convergência, a quantidade e o arranjo dos módulos constituem os principais parâmetros associados ao desempenho dos dispositivos. Verificou-se que alterações geométricas influenciam significativamente a velocidade do escoamento e a distribuição do fluxo de ar, porém os ganhos térmicos apresentam comportamento variável em função das condições ambientais, das características construtivas das edificações e das metodologias de ensaio adotadas. Conclui-se que, embora ainda não exista consenso sobre uma configuração geométrica universalmente superior, a sistematização das evidências permite identificar parâmetros promissores para o desenvolvimento de dispositivos de resfriamento passivo mais eficientes, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e para o projeto EcoVentus, voltado à aplicação dessa tecnologia em habitações de interesse social no semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Eco-cooler. Resfriamento passivo. Conforto térmico. Mecânica dos fluidos. Revisão sistemática.

ABSTRACT

Rising temperatures in semiarid regions and limited access to conventional air conditioning systems highlight the need for passive cooling strategies capable of providing thermal comfort with low energy consumption. In this context, Eco-cooler-type devices stand out as a low-cost alternative based on the principles of the Equation of Continuity, Bernoulli's Equation, and the Venturi effect. The objective of this study was to identify, through a systematic literature review, the main geometric parameters investigated in Eco-cooler-type passive cooling devices and to analyze their influence on thermal and aerodynamic performance. The research was conducted in accordance with the PRISMA protocol recommendations, through searches in the Google Scholar, Scopus, Web of Science, SciELO, and CAPES Journal Portal databases, supplemented by the snowballing technique. After applying the inclusion and exclusion criteria, 12 studies published between 2018 and 2024 were selected for analysis. The results showed that the contraction ratio between the inlet and outlet diameters, the nozzle geometry, the convergence angle, and the number and arrangement of the modules are the main parameters associated with the devices' performance. It was found that geometric changes significantly influence flow velocity and airflow distribution; however, thermal gains exhibit variable behavior depending on environmental conditions, building construction characteristics, and the testing methodologies adopted. It is concluded that, although there is still no consensus on a universally superior geometric configuration, the systematization of the evidence allows for the identification of promising parameters for the development of more efficient passive cooling devices, providing a basis for future research and for the EcoVentus project, aimed at applying this technology in social housing in the Brazilian semi-arid region.

Keywords: Eco-cooler. Passive cooling. Thermal comfort. Fluid mechanics. Systematic review.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo Eco-Cooler	12
Figura 2 - Delimitação do Semiárido Brasileiro	16
Figura 3 - “Eco-Cooler” tradicional	21
Figura 4 - Tubo de Venturi.....	25
Figura 5 - Direção do fluxo através do bocal	26
Figura 6 - Representação do bocal	28
Figura 7 - Fluxograma de etapas consideradas na revisão sistemática	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estratégias de busca utilizadas na revisão.....	31
Tabela 2 - Critérios de inclusão e exclusão dos estudos	32
Tabela 3 - Caracterização geral dos estudos	38
Tabela 4 - Síntese dos parâmetros investigados.....	39
Tabela 5 - Comparação das configurações geométricas relacionadas à razão de contração dos dispositivos tipo Eco-cooler	40
Tabela 6 - Comparação das geometrias dos bocais investigadas nos estudos selecionados	43
Tabela 7 - Influência das condições ambientais sobre o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler	45
Tabela 8 - Aplicações dos dispositivos tipo Eco-cooler em edificações.....	47
Tabela 9 - Síntese das evidências encontradas na literatura sobre os fatores que influenciam o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler.....	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Geral	14
1.1.2 Específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 CONFORTO TÉRMICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS	15
2.2 CONFORTO TÉRMICO EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL	17
2.3 ESTRATÉGIAS DE RESFRIAMENTO PASSIVO	18
2.4 DISPOSITIVOS TIPO ECO-COOLER	20
2.5 PRINCÍPIOS FÍSICOS: LEI DE BERNOULLI E EFEITO VENTURI	23
2.5.1 Equação da Continuidade	23
2.5.2 Equação de Bernoulli	24
2.5.3 Efeito Venturi	25
2.5.4 Aplicação dos princípios físicos aos dispositivos tipo Eco-cooler	26
2.5.5 Parâmetros geométricos relevantes	27
3 METODOLOGIA	30
3.1 PROTOCOLO DE PESQUISA	30
3.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	32
3.3 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS	33
3.4 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	35
3.5 ANÁLISE DOS DADOS	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS SELECIONADOS	36
4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	39
4.2.1 Influência da razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída	40
4.2.2 Influência da geometria do bocal	42
4.2.3 Influência das condições ambientais no desempenho dos dispositivos	44
4.2.4 Aplicações dos dispositivos tipo Eco-cooler em edificações	47
4.3 SÍNTESE DAS EVIDÊNCIAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA	49
5 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

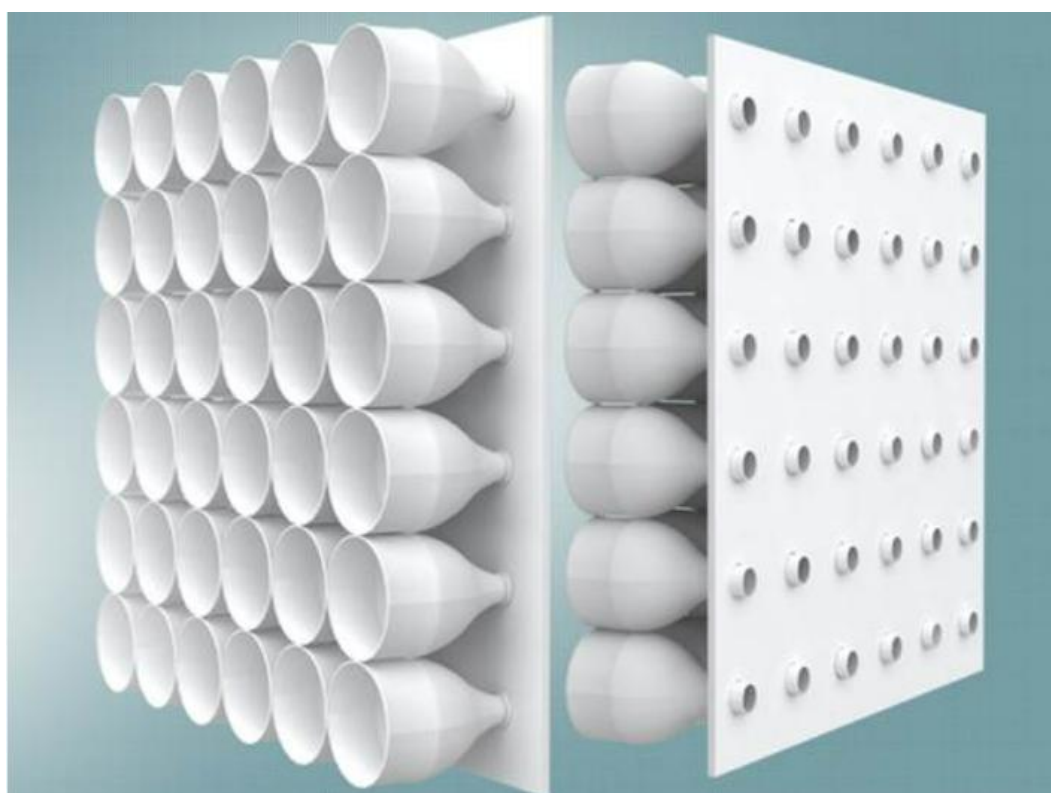
O Semiárido Nordeste caracteriza-se por apresentar elevadas temperaturas, baixa umidade relativa do ar durante grande parte do ano e intensa incidência de radiação solar, condições que tornam o conforto térmico um dos principais desafios para a população da região. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), municípios como Patos, no sertão da Paraíba, registram temperaturas médias entre 29 °C e 36,6 °C ao longo do ano, com picos frequentemente superiores a 40°C nos meses mais quentes. Esse cenário afeta diretamente a qualidade de vida da população, sobretudo das famílias em situação de vulnerabilidade socioeconômica que residem em habitações de interesse social, muitas vezes projetadas sem a incorporação de estratégias bioclimáticas capazes de minimizar os efeitos das elevadas temperaturas.

Nesse contexto, o uso de aparelhos de ar-condicionado constitui a principal alternativa para reduzir o desconforto térmico em ambientes internos. Entretanto, o elevado custo de aquisição, instalação e operação desses equipamentos limita sua utilização por grande parcela da população do semiárido brasileiro. Essa realidade está inserida em um contexto mais amplo de pobreza energética, caracterizado pela dificuldade de acesso a serviços energéticos essenciais em níveis adequados para assegurar qualidade de vida e bem-estar, condição que afeta de forma mais intensa famílias de baixa renda e grupos socialmente vulneráveis (Bezerra *et al.*, 2022). Além do impacto econômico sobre os domicílios, o uso intensivo de sistemas de climatização contribui para o aumento da demanda energética e dos impactos ambientais associados à geração de eletricidade. Nesse cenário, estratégias de resfriamento passivo assumem papel fundamental ao possibilitar melhorias nas condições de conforto térmico com reduzido consumo de energia, constituindo uma das principais diretrizes da arquitetura bioclimática (Szokolay, 2008).

A busca por estratégias passivas de resfriamento também se relaciona aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 3, relacionado à saúde e ao bem-estar; ao ODS 7, que trata do acesso à energia limpa e acessível; ao ODS 11, voltado a cidades e comunidades sustentáveis; e ao ODS 13, relacionado à ação contra a mudança global do clima. A adoção de soluções de baixo consumo energético para melhorar as condições térmicas das edificações pode contribuir, portanto, para a promoção do bem-estar dos ocupantes, para a redução da demanda por climatização artificial e para a adaptação das edificações às condições climáticas adversas.

Entre as estratégias de resfriamento passivo, destacam-se os dispositivos do tipo Eco-cooler, ilustrado na figura 1, planejados para aumentar a velocidade do fluxo de ar por meio da redução da seção transversal dos bocais, utilizando os princípios da Equação da Continuidade, da Equação de Bernoulli e do efeito Venturi. Desenvolvido originalmente em Bangladesh como uma solução de baixo custo para comunidades sem acesso à climatização convencional, o Eco-cooler passou a despertar interesse científico em diferentes países, dando origem a estudos experimentais e simulações computacionais voltados à avaliação de seu desempenho térmico e aerodinâmico. As pesquisas demonstram que o dispositivo pode contribuir para o aumento da ventilação natural e, em determinadas condições, favorecer reduções da temperatura e melhorias na sensação de conforto térmico. Entretanto, a magnitude desses efeitos varia consideravelmente em função da geometria dos bocais, das condições ambientais e da metodologia empregada em cada estudo.

Figura 1 - Modelo Eco-Cooler



Fonte: LBN Análises, 2016.

A evolução das pesquisas evidencia que o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler não depende apenas do princípio físico de funcionamento, mas também de aspectos relacionados ao seu projeto geométrico. Diferentes estudos investigaram a influência da razão

de contração entre os diâmetros de entrada e saída, do formato dos bocais, do comprimento dos condutos e arranjo dos módulos, além das condições ambientais de ensaio, obtendo resultados distintos quanto ao aumento da velocidade do ar e à redução da temperatura (Bhanuprakash, Mummina e Mahesh Chakravarthi, 2018; Kasantikul, 2020; Pratiwi; Arifin, 2021; Hadi *et al.*, 2023; Bunker *et al.*, 2024). Essa diversidade de abordagens demonstra o avanço da temática, mas também dificulta a identificação das configurações mais eficientes, uma vez que os estudos utilizam metodologias, geometrias e condições experimentais distintas.

Dessa forma, observa-se uma lacuna na literatura quanto à sistematização das evidências disponíveis sobre os parâmetros geométricos que efetivamente influenciam o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler. Embora existam diversos estudos experimentais e numéricos sobre o tema, poucos trabalhos reúnem e analisam criticamente seus resultados de forma integrada, permitindo identificar convergências, divergências e limitações das diferentes configurações investigadas. Essa síntese torna-se particularmente relevante para subsidiar o desenvolvimento de novas soluções de resfriamento passivo adaptadas às condições climáticas do semiárido brasileiro. Nesse contexto, emerge a seguinte questão de pesquisa: quais parâmetros geométricos dos dispositivos de resfriamento passivo tipo Eco-cooler, segundo os estudos experimentais e de simulação disponíveis na literatura, exercem maior influência sobre o desempenho térmico e aerodinâmico desses sistemas?

Essa discussão torna-se especialmente relevante no contexto das habitações de interesse social (HIS) localizadas no semiárido brasileiro, onde as elevadas temperaturas, associadas às limitações econômicas da população e, frequentemente, às características construtivas das edificações, comprometem significativamente as condições de conforto térmico. Nesse cenário, soluções passivas de baixo custo, fácil execução e reduzido impacto ambiental representam uma alternativa promissora para minimizar o desconforto térmico e reduzir a dependência de sistemas ativos de climatização. Além da contribuição científica, esta pesquisa apresenta relevância tecnológica e social. A compreensão dos fatores que condicionam o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler pode subsidiar o desenvolvimento de soluções passivas voltadas às habitações de interesse social, ampliando as possibilidades de aplicação de tecnologias de baixo custo em regiões caracterizadas por elevadas temperaturas e limitações de acesso aos sistemas convencionais de climatização.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar, analisar e sintetizar os principais parâmetros geométricos investigados em dispositivos de resfriamento passivo do tipo Eco-cooler, buscando compreender sua influência sobre o desempenho térmico e aerodinâmico desses sistemas. Além de contribuir

para a organização do conhecimento científico disponível, esta pesquisa fornece embasamento técnico para o desenvolvimento do projeto EcoVentus, em execução no Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus Patos, que tem como objetivo desenvolver uma janela resfriadora passiva produzida por impressão 3D, utilizando preferencialmente materiais plásticos reciclados como alternativa sustentável para melhoria do conforto térmico em habitações localizadas no semiárido brasileiro. Assim, a revisão sistemática realizada constitui a base científica para a definição dos parâmetros geométricos, dos protocolos de ensaio e das decisões de projeto que orientarão o desenvolvimento e a validação experimental dessa tecnologia voltada às condições climáticas do semiárido nordestino.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Identificar os principais parâmetros geométricos investigados em dispositivos de resfriamento passivo do tipo Eco-cooler e sua relação com o desempenho térmico e aerodinâmico.

1.1.2 Específicos

- Identificar estudos científicos nas bases Google *Scholar*, Portal de Periódicos CAPES e SciELO, *Web of Science* e *Scopus*, utilizando os termos de busca definidos e aplicar os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.
- Para cada estudo incluído realizar a extração e organização dos dados referentes às configurações geométricas dos dispositivos, como diâmetro de entrada, diâmetro de saída, razão de contração, forma do bocal, número de bocais, arranjo e demais parâmetros informados.
- Sistematizar os dados de desempenho térmico e aerodinâmico reportados nos estudos, incluindo redução de temperatura, velocidade do ar, alcance do fluxo e condições ambientais de ensaio, quando disponíveis.
- Analisar criticamente as convergências, divergências e lacunas identificadas na literatura quanto à influência dos parâmetros geométricos no desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler.

- Identificar, com base nas evidências levantadas, os parâmetros mais promissores para subsidiar o desenvolvimento de dispositivos de resfriamento passivo aplicáveis ao contexto do semiárido nordestino.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

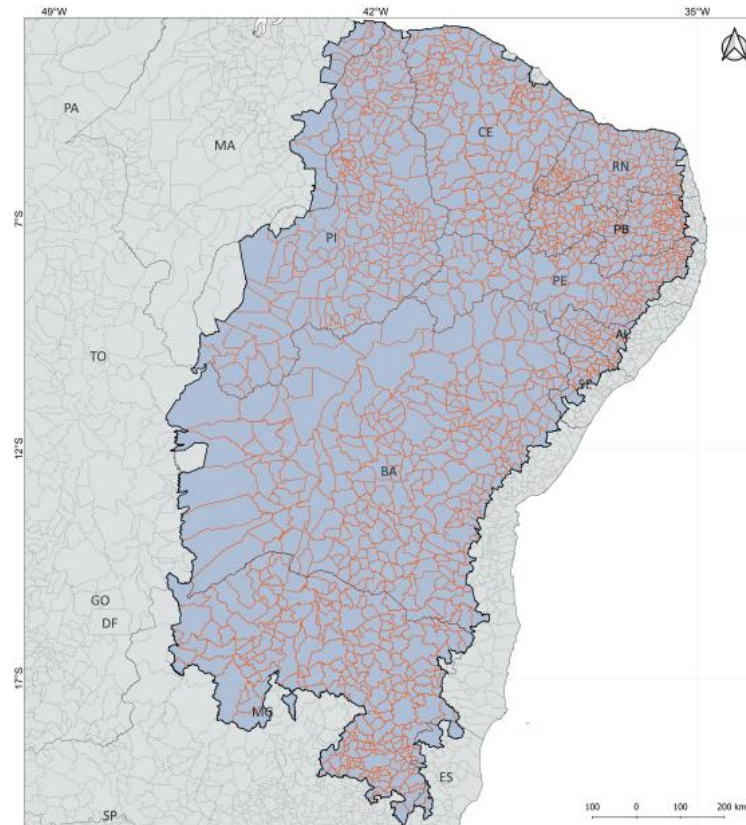
A fundamentação teórica deste estudo reúne os principais conceitos e pesquisas que subsidiam a análise do potencial de dispositivos de resfriamento passivo aplicados a Habitações de Interesse Social no Semiárido Nordeste. Inicialmente, são discutidos os aspectos relacionados ao conforto térmico em regiões de clima quente e seco e às características das habitações destinadas à população de baixa renda. Em seguida, são apresentadas as principais estratégias de resfriamento passivo descritas na literatura, com ênfase na ventilação natural, no resfriamento evaporativo e no sombreamento, estabelecendo a base conceitual necessária para a compreensão do funcionamento e da aplicação dos dispositivos tipo Eco-cooler.

2.1 CONFORTO TÉRMICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

O conforto térmico é fator determinante na qualidade de vida em ambientes internos, sendo definido pela norma ASHRAE-55 (2020), da American Society of Heating, como a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico. Tal condição se dá por uma combinação de variáveis, como a temperatura, umidade, velocidade do ar, entre outros fatores individuais.

Em regiões semiáridas, como o sertão nordestino brasileiro, essas variáveis apresentam comportamento extremo. As temperaturas médias anuais são constantemente elevadas e os períodos de precipitação são escassos e irregulares. Essas condições intensificam as dificuldades enfrentadas por famílias em situação de vulnerabilidade socioeconômica, que habitam, muitas vezes, locais com baixa qualidade térmica e sem acesso a sistemas convencionais de climatização. A delimitação territorial do Semiárido brasileiro evidencia a extensão da região submetida a essas condições climáticas, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Delimitação do Semiárido Brasileiro



Fonte: Instituto Nacional do Semiárido (INSA/MCTI), 2024.

De acordo com a NBR 16401-2 (ABNT, 2024), ambientes internos devem atender a faixas específicas de temperatura e umidade para garantir conforto térmico. No entanto, em áreas de vulnerabilidade socioeconômica, o atendimento a esses parâmetros é frequentemente limitado devido à ausência de infraestrutura adequada e à limitação de recursos para climatização artificial.

Além do desconforto, a exposição prolongada a ambientes termicamente inadequados pode gerar impactos negativos à saúde, incluindo desidratação, fadiga térmica e até mesmo o agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias. Assim, o estudo de estratégias que promovam conforto térmico em regiões semiáridas torna-se essencial, especialmente quando voltado a populações de baixa renda.

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de estratégias capazes de promover melhores condições de conforto térmico em edificações inseridas em regiões semiáridas, especialmente aquelas destinadas às populações de maior vulnerabilidade socioeconômica. Nesse contexto, soluções passivas de condicionamento ambiental surgem como alternativas promissoras por aliarem baixo consumo energético, reduzido impacto ambiental e potencial de aplicação em habitações de interesse social, tema aprofundado na seção seguinte.

2.2 CONFORTO TÉRMICO EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

Caccia *et al.* (2017, p. 29) definem Habitação de Interesse Social (HIS) como a "produção habitacional subsidiada pelo Estado destinada à população de baixa renda com o objetivo de prover moradias adequadas e regularizadas, respondendo aos problemas sociais de interesse de toda a sociedade".

Em junho de 2005 foi instituído o SNHIS (Sistema Nacional de Habitação de Interesse Social) que, de acordo com o Ministério das Cidades tem como objetivo central implementar políticas e programas que promovam o acesso à moradia digna para a população de baixa renda. Tais programas, como o Minha Casa Minha Vida (PMCMV), retomado pelo Governo Federal em 2023, desempenham papel fundamental na ampliação do acesso à moradia para famílias em situação de vulnerabilidade socioeconômica.

A importância dessas políticas pode ser observada a partir dos indicadores habitacionais nacionais. Segundo a Fundação João Pinheiro (2023), o déficit habitacional brasileiro atingiu aproximadamente 6,2 milhões de domicílios em 2022, concentrando-se principalmente entre as famílias de menor renda. Na região Nordeste, essa vulnerabilidade é ainda mais expressiva: 83,3% do déficit habitacional total da região está concentrado em famílias da Faixa 1 de rendimento, correspondente aos domicílios com renda bruta familiar mensal de até R\$ 2.640,00, o maior percentual registrado entre todas as regiões do país. Além da insuficiência quantitativa de moradias, o estudo aponta a persistência de inadequações habitacionais relacionadas à infraestrutura, adensamento excessivo e condições construtivas precárias, fatores que impactam diretamente a qualidade de vida e o conforto ambiental dos moradores.

As tipologias construtivas predominantes nas Habitações de Interesse Social (HIS) brasileiras utilizam tradicionalmente sistemas de alvenaria de vedação em blocos cerâmicos ou de concreto. Embora essas soluções priorizem o baixo custo de execução, muitas vezes ocorre uma reprodução de projetos que não considera as especificidades climáticas regionais e as diferentes zonas bioclimáticas do país. De acordo com Sacht e Rossignolo (2009), em tipologias térreas com cobertura de telha cerâmica sem laje, o desempenho térmico no verão é insuficiente em diversas regiões, devido à falta de isolamento na cobertura, favorecendo o ganho de calor e a elevação das temperaturas internas.

No Semiárido Nordeste, as condições climáticas caracterizadas por elevadas temperaturas, intensa radiação solar e baixos índices pluviométricos impõem exigências adicionais ao desempenho das edificações. Nesse contexto, o conforto térmico torna-se um

fator essencial para a qualidade de vida da população, sobretudo em habitações destinadas a famílias de menor poder aquisitivo, que frequentemente possuem acesso limitado a sistemas mecânicos de climatização. Mendes e Cândido (2020), ao analisarem uma Habitação de Interesse Social (HIS) do Programa Minha Casa Minha Vida, localizada no semiárido cearense, verificaram que a edificação estudada não atendeu aos critérios mínimos de desempenho térmico estabelecidos pela NBR 15.575 (ABNT, 2013) e que os mecanismos de dissipação térmica recomendados pelas normas brasileiras, como a NBR 15.220 (ABNT, 2005), mostraram-se insuficientes para proporcionar o nível mínimo de conforto térmico, evidenciando as limitações das soluções construtivas convencionalmente empregadas frente às condições climáticas do semiárido. Estudos voltados ao desempenho térmico das edificações demonstram que a adoção de estratégias passivas, como ventilação natural e sombreamento, contribui para a melhoria das condições ambientais internas e para a redução da dependência de sistemas mecânicos de climatização. Silva (2025) quantifica que o uso da ventilação natural e do sombreamento pode promover reduções na temperatura interna de aproximadamente 2,8 °C e 2,5 °C, respectivamente, favorecendo o conforto térmico em regiões de clima quente. Entretanto, os resultados indicam que tais estratégias podem ser insuficientes se utilizadas isoladamente durante períodos de maior severidade climática. De forma complementar, o estudo de Angueth e Sales (2024) aponta que o sombreamento associado à adequada configuração das aberturas promove melhorias no desempenho térmico das edificações, embora a efetividade dessas soluções dependa diretamente das características construtivas e das condições climáticas locais.

Diante das limitações observadas nas soluções construtivas convencionais e da necessidade de tecnologias compatíveis com a realidade socioeconômica das populações residentes no Semiárido Nordeste, torna-se relevante ampliar a investigação de estratégias passivas capazes de potencializar o conforto térmico sem elevar o consumo energético das edificações.

2.3 ESTRATÉGIAS DE RESFRIAMENTO PASSIVO

As estratégias de resfriamento passivo consistem em métodos capazes de promover conforto térmico sem a utilização direta de energia elétrica, utilizando mecanismos naturais de transferência de calor, ventilação e circulação do ar para reduzir a temperatura interna das edificações. Essas estratégias possuem origem nos princípios da arquitetura bioclimática, abordagem que busca adequar o projeto arquitetônico às condições climáticas

locais, visando maximizar o conforto térmico e minimizar o consumo energético (SZOKOLAY, 2008).

Em regiões de clima quente e seco, como o semiárido nordestino, tais estratégias assumem papel fundamental devido às elevadas temperaturas médias anuais e às limitações socioeconômicas relacionadas ao acesso à climatização artificial. Diferentemente dos sistemas ativos, como aparelhos de ar-condicionado e ventiladores, os sistemas passivos buscam reduzir a temperatura interna dos ambientes por meio do aproveitamento das condições climáticas e da dinâmica natural dos fluidos.

Segundo Santamouris (2005), técnicas passivas de resfriamento podem proporcionar reduções significativas na demanda energética das edificações, contribuindo simultaneamente para a melhoria do conforto térmico e para a redução dos impactos ambientais associados ao consumo de energia. Entre as principais estratégias passivas destacam-se a ventilação natural, a ventilação cruzada, o resfriamento evaporativo e o sombreamento. A ventilação natural promove a renovação do ar e favorece a dissipação do calor, enquanto a ventilação cruzada potencializa esse processo por meio da circulação do ar entre aberturas posicionadas em fachadas distintas da edificação. O resfriamento evaporativo utiliza a evaporação da água para reduzir a temperatura do ar, sendo mais eficiente em climas quentes e secos, e o sombreamento busca minimizar os ganhos térmicos provenientes da radiação solar por meio de elementos como brises, beirais e vegetação (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Dentre as estratégias apresentadas, a ventilação natural merece destaque por constituir o princípio de funcionamento dos dispositivos do tipo Eco-cooler. Baseada no aproveitamento das forças naturais responsáveis pela movimentação do ar, como a ação dos ventos e as diferenças de pressão entre os ambientes, essa estratégia favorece a remoção do calor acumulado e a melhoria das condições de conforto térmico.

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a ventilação natural pode contribuir significativamente para a melhoria das condições ambientais internas, reduzindo a necessidade de utilização de sistemas mecânicos de climatização e, consequentemente, o consumo energético das edificações. Além da remoção do calor sensível presente no ambiente, o aumento da velocidade do ar sobre os ocupantes proporciona melhoria da sensação térmica, tornando as temperaturas elevadas mais toleráveis em regiões de clima quente. Uma das formas mais eficientes de aproveitamento da ventilação natural é a ventilação cruzada, caracterizada pela existência de aberturas em fachadas opostas ou adjacentes da edificação, permitindo o estabelecimento de um fluxo contínuo de ar entre os

ambientes. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) destacam que a eficiência dessa estratégia depende da orientação da edificação em relação aos ventos predominantes, da dimensão e da localização das aberturas, bem como da ausência de obstáculos que comprometam o escoamento do ar. Em regiões de clima quente, a ventilação cruzada favorece a renovação do ar e a dissipação do calor interno, contribuindo para a melhoria do conforto térmico e para a redução da necessidade de climatização mecânica.

No contexto do semiárido brasileiro, Silva (2025) verificou que estratégias baseadas na ventilação natural apresentam potencial para melhorar as condições térmicas internas das edificações, especialmente quando associadas a outras medidas passivas. Nesse contexto, inserem-se os dispositivos do tipo Eco-cooler, que utilizam a ventilação natural associada aos princípios da Mecânica dos Fluidos para modificar o comportamento do escoamento do ar. Em razão de suas características construtivas e de seu potencial de aplicação em Habitações de Interesse Social, esses dispositivos são discutidos na seção seguinte.

2.4 DISPOSITIVOS TIPO ECO-COOLER

Dentre as novas tecnologias de resfriamento passivo desenvolvidas nas últimas décadas, destaca-se o Eco-cooler, desenvolvido originalmente em Bangladesh, por Ashis Paul, supervisor criativo da Grey Group Dhaka, com o objetivo de oferecer uma alternativa acessível de conforto térmico para comunidades sem acesso à climatização convencional. O dispositivo, apresentado na figura 2, utiliza garrafas plásticas reutilizadas acopladas a painéis instalados em aberturas das edificações, operando sem consumo de energia elétrica (IDEASS, 2016).

Figura 3 - “Eco-Cooler” tradicional



Fonte: Plastics the mag, 2018.

Além do potencial para melhoria das condições térmicas, o dispositivo apresenta caráter socioambiental relevante ao promover o reaproveitamento de resíduos plásticos e possibilitar sua implementação com a participação da própria comunidade. Nesse sentido, Naveenkumar *et al.* (2018) destacam que soluções sustentáveis dessa natureza, além de contribuírem para o conforto térmico, incentivam práticas de reciclagem e ampliam o engajamento comunitário na busca por alternativas adaptadas às realidades locais.

Tradicionalmente, o Eco-cooler consiste em uma placa contendo garrafas plásticas cortadas e fixadas de forma a criar bocais convergentes distribuídos ao longo da superfície instalada em janelas ou outras aberturas da edificação. A extremidade de maior diâmetro fica voltada para o ambiente externo, enquanto a parte correspondente ao gargalo é direcionada para o interior do ambiente. Essa configuração permite o aproveitamento da ventilação natural, promovendo a aceleração do escoamento do ar por meio da redução da seção transversal dos bocais. O comportamento desse escoamento é explicado pelos princípios da Equação da Continuidade, da Equação de Bernoulli e do efeito Venturi, discutidos na seção seguinte.

Embora sua concepção inicial tenha sido baseada na utilização de garrafas PET reutilizadas, observa-se uma evolução significativa dos dispositivos investigados pela

literatura científica. Estudos recentes passaram a explorar diferentes configurações dos sistemas, incluindo alterações relacionadas ao formato dos bocais, à razão de contração em diâmetros de entrada e saída, quantidade de elementos, disposição geométrica e condições de operação. Adicionalmente, ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) vêm sendo amplamente empregadas para complementar análises experimentais, permitindo avaliar o comportamento do escoamento do ar e complementar a análise do desempenho térmico desses dispositivos (Kasantikul, 2020; Pratiwi; Attaufiq, 2024).

A literatura recente demonstra que o Eco-cooler deixou de ser apenas uma solução artesanal baseada em garrafas PET reutilizadas e passou a constituir objeto de investigação científica em diferentes países. Estudos experimentais e de simulação computacional têm avaliado modificações na geometria dos bocais, nas condições de operação e na configuração dos dispositivos, buscando compreender sua influência sobre o comportamento do escoamento e sobre o desempenho térmico. Esse avanço evidencia a transição do Eco-cooler de uma solução empírica para uma tecnologia em processo de otimização fundamentada em princípios da Mecânica dos Fluidos.

Entretanto, apesar do crescente interesse científico pelo tema, ainda não existe consenso acerca dos fatores responsáveis pelo melhor desempenho térmico e aerodinâmico dos dispositivos tipo Eco-cooler. Os estudos disponíveis apresentam diferenças quanto às geometrias analisadas, aos métodos experimentais empregados, às condições climáticas avaliadas e às métricas utilizadas para quantificar a eficiência térmica. Observa-se, ainda, ausência de padronização em parâmetros como diâmetros de entrada e saída, razão de contração, quantidade de bocais e velocidades do vento consideradas nos ensaios, dificultando a comparação direta entre os resultados reportados pela literatura.

Dessa forma, evidencia-se a necessidade de sintetizar criticamente as evidências disponíveis sobre o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler, buscando identificar quais parâmetros geométricos e operacionais têm sido mais frequentemente associados à melhoria do desempenho térmico e aerodinâmico. Para compreender como essas variáveis influenciam o comportamento do dispositivo, torna-se necessário analisar os princípios físicos que fundamentam seu funcionamento, particularmente a Equação de Bernoulli e o efeito Venturi, apresentados na seção seguinte.

Até o momento, não foram identificadas normas técnicas específicas destinadas ao dimensionamento, à fabricação ou à avaliação do desempenho térmico e aerodinâmico de dispositivos do tipo Eco-cooler. Dessa forma, os estudos encontrados na literatura

apresentam diferentes procedimentos experimentais, parâmetros geométricos e critérios de avaliação, o que contribui para a heterogeneidade dos resultados e dificulta a comparação direta entre as pesquisas.

2.5 PRINCÍPIOS FÍSICOS: LEI DE BERNOULLI E EFEITO VENTURI

2.5.1 Equação da Continuidade

A Equação da Continuidade expressa matematicamente o princípio da conservação da massa aplicado ao escoamento dos fluidos. Para fluidos incompressíveis em regime permanente, a vazão mássica permanece constante ao longo de uma linha de corrente, de modo que qualquer redução na área da seção transversal do escoamento deve ser acompanhada por um aumento correspondente da velocidade do fluido (Munson, Young e Okiishi, 2004).

Matematicamente, a Equação da Continuidade pode ser expressa por:

$$Q = A \times V$$

Onde:

(Q) = vazão volumétrica (m³/s);

(A) = área da seção transversal (m²);

(V) = velocidade média do escoamento (m/s).

Para um fluido incompressível escoando em regime permanente, a vazão permanece constante ao longo do sistema. Assim, considerando duas seções distintas, obtém-se a Equação da Continuidade:

$$A1 \times V1 = A2 \times V2$$

(A1) e (A2) correspondem as áreas das seções 1 e 2 (m²)

(V1) e (V2) representam as velocidades médias do escoamento nas respectivas seções (m/s).

A Equação da Continuidade demonstra que a velocidade do fluido varia inversamente com a área disponível para o escoamento. Dessa forma, quando ocorre uma redução da seção transversal, a velocidade do fluido aumenta para que a vazão permaneça constante. De maneira análoga, o aumento da área de passagem resulta na redução da velocidade do escoamento (Munson, Young e Okiishi, 2004).

Esse princípio é particularmente importante para a compreensão do comportamento aerodinâmico dos dispositivos tipo Eco-cooler, uma vez que os bocais utilizados nesses sistemas apresentam variações geométricas que promovem mudanças na área de passagem do ar. Consequentemente, modificações nos diâmetros de entrada e saída dos bocais podem alterar significativamente a velocidade do escoamento e, consequentemente, influenciar a distribuição do fluxo de ar no interior da edificação.

2.5.2 Equação de Bernoulli

A Equação de Bernoulli constitui uma das principais relações da Mecânica dos Fluidos, expressando a conservação da energia mecânica ao longo de uma linha de corrente para fluidos incompressíveis em regime permanente e sem perdas significativas de energia. Nessa formulação, a soma das parcelas de energia associadas à pressão, à velocidade e à posição permanece constante ao longo do escoamento (Munson, Young e Okiishi, 2004).

A equação é representada por:

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \gamma z = \text{constante}$$

Onde:

p = pressão do fluido (Pa);

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3);

V = velocidade do escoamento (m/s);

γ = peso específico do fluido (N/m^3);

z = cota geométrica ou elevação em relação a um plano de referência (m).

A Equação de Bernoulli demonstra que a energia mecânica total de um fluido em escoamento pode ser representada pela soma das parcelas associadas à pressão, à energia cinética e à energia potencial gravitacional. Dessa forma, um aumento da velocidade do escoamento tende a ser acompanhado por uma redução da pressão estática, desde que as demais parcelas permaneçam constantes (Munson, Young e Okiishi, 2004).

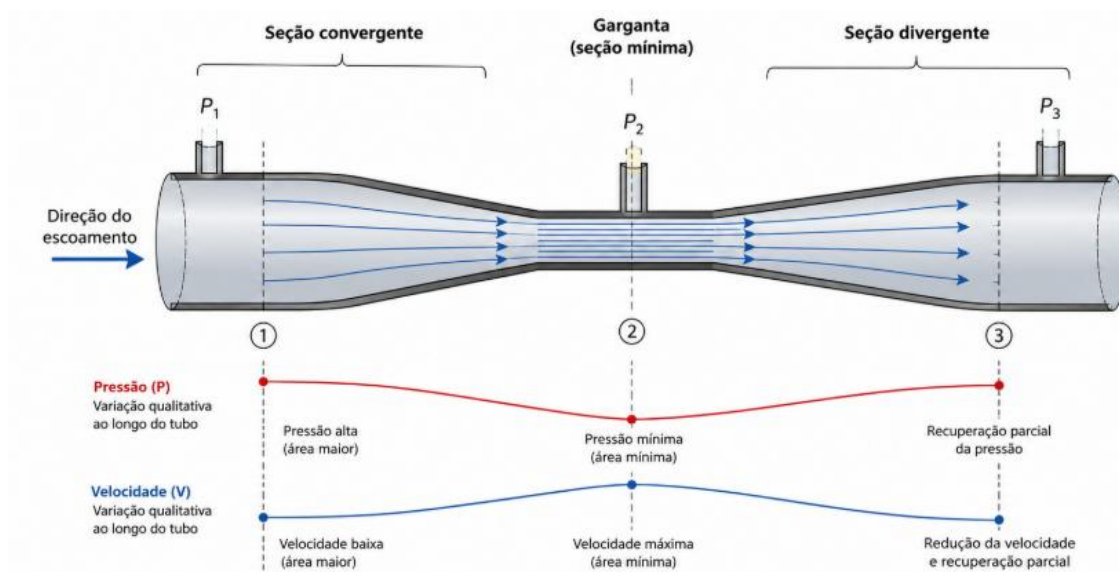
Essa relação constitui um dos fundamentos físicos para a compreensão do comportamento do ar em dispositivos que apresentam variações em sua seção transversal, como os sistemas tipo Eco-cooler.

2.5.3 Efeito Venturi

O Efeito Venturi descreve o comportamento de um fluido ao atravessar uma região com redução da área de escoamento. De acordo com Pritchard (2011), a diminuição da seção transversal provoca um aumento da velocidade do fluido, conforme previsto pela Equação da Continuidade. Simultaneamente, ocorre uma redução da pressão estática, fenômeno explicado pela Equação de Bernoulli.

O dispositivo clássico utilizado para demonstrar esse fenômeno é o tubo de Venturi (figura 3), constituído por uma seção convergente, uma garganta e uma seção divergente. Na região convergente, a área de passagem do fluido é gradualmente reduzida, promovendo sua aceleração. Na garganta, onde a área é mínima, são observadas as maiores velocidades e as menores pressões. Em seguida, na seção divergente, ocorre a desaceleração do escoamento e a recuperação parcial da pressão (Pritchard, 2011).

Figura 4 - Tubo de Venturi



Fonte: Elaborado pela autora com o auxílio de inteligência artificial, 2026.

Embora frequentemente associado ao resfriamento do ar, o efeito Venturi está diretamente relacionado à aceleração do escoamento e à redução da pressão estática, não implicando, isoladamente, redução significativa da temperatura do fluido.

A compreensão do Efeito Venturi é fundamental para o estudo de dispositivos que utilizam geometrias convergentes para modificar as condições de escoamento do ar. Nesse contexto, as variações de área presentes nos bocais dos dispositivos tipo Eco-cooler

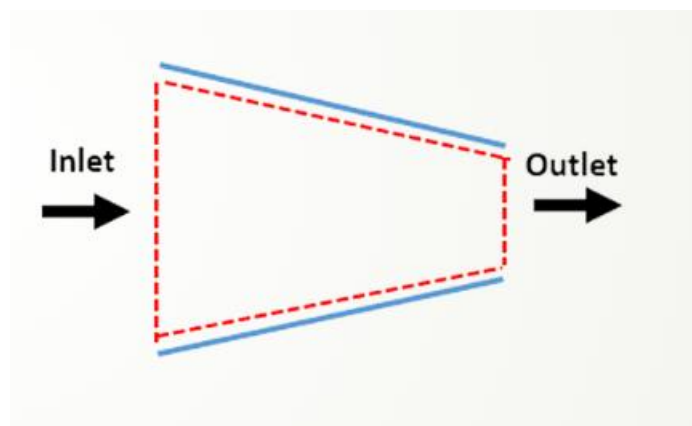
influenciam diretamente a velocidade do fluxo e a distribuição de pressões, tornando os princípios associados ao tubo de Venturi uma importante referência para a análise do comportamento aerodinâmico desses sistemas.

2.5.4 Aplicação dos princípios físicos aos dispositivos tipo Eco-cooler

Os dispositivos tipo Eco-cooler apresentam geometrias que se assemelham, em termos funcionais, ao comportamento observado em tubos de Venturi. A configuração tradicional baseada em garrafas plásticas reutilizadas promove a passagem do ar por regiões de diferentes áreas transversais, alterando as condições de escoamento no interior dos bocais.

De acordo com a Equação da Continuidade, a redução da área de passagem tende a provocar o aumento da velocidade do escoamento do ar, uma vez que a vazão deve permanecer constante ao longo do sistema para fluidos incompressíveis em regime permanente (Munson, Young e Okiishi, 2004). Simultaneamente, a Equação de Bernoulli estabelece que o aumento da velocidade está associado à redução da pressão estática do fluido, desde que sejam atendidas as condições de aplicação do modelo (Munson, Young e Okiishi, 2004). Nos dispositivos do tipo Eco-cooler, esses princípios são empregados para modificar o comportamento do escoamento do ar por meio da geometria dos bocais, buscando intensificar a circulação do ar e favorecer as trocas térmicas entre o ambiente interno e o externo. A Figura 5 ilustra a direção do fluxo de ar através do dispositivo.

Figura 5 - Direção do fluxo através do bocal



Fonte: Kasantikul, 2020.

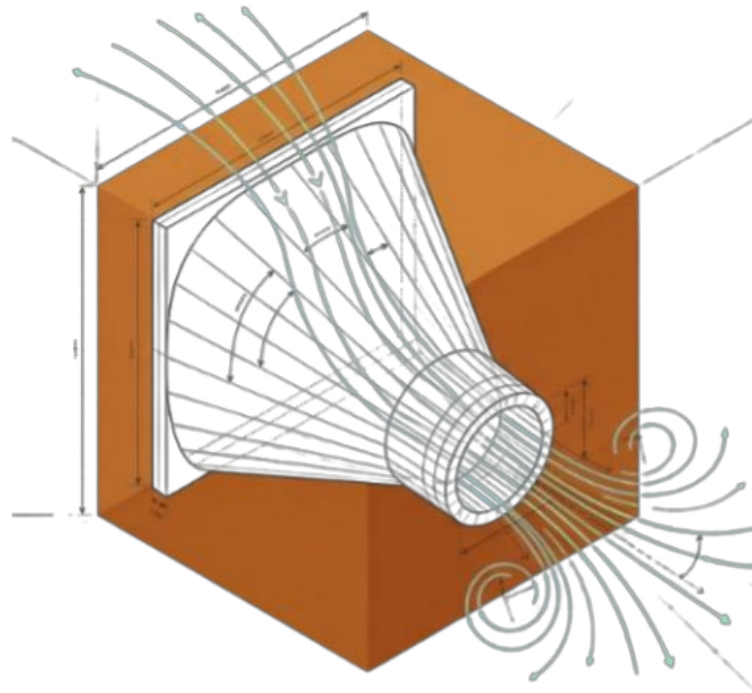
Assim, a geometria do dispositivo influencia diretamente parâmetros como velocidade do ar, distribuição do fluxo e perdas de carga, os quais podem refletir no desempenho térmico do sistema. Contudo, a magnitude desse efeito depende também das condições climáticas, da forma de instalação do dispositivo e das características construtivas da edificação.

Considerando que os princípios da Mecânica dos Fluidos demonstram que a geometria dos bocais influencia o comportamento do escoamento e, conseqüentemente, pode afetar o desempenho térmico dos dispositivos, estudos recentes têm investigado diferentes configurações geométricas em busca de maior eficiência. Entretanto, ainda não existe consenso na literatura acerca dos parâmetros geométricos mais adequados para maximizar o desempenho térmico e aerodinâmico dos dispositivos do tipo Eco-cooler. Aspectos como diâmetros de entrada e saída, razão de contração, ângulo de convergência e quantidade de bocais têm sido avaliados por diferentes autores, evidenciando a necessidade de uma análise sistemática das evidências disponíveis.

2.5.5 Parâmetros geométricos relevantes

A geometria dos bocais constitui um dos principais fatores capazes de influenciar o comportamento do escoamento do ar em dispositivos tipo Eco-cooler. Entre os parâmetros geométricos mais relevantes destaca-se a razão de contração, definida como a relação entre o diâmetro de saída e o diâmetro de entrada do bocal. A Figura 6 apresenta uma representação esquemática de um bocal convergente, evidenciando a redução da seção de passagem e o comportamento do escoamento do ar.

Figura 6 - Representação do bocal



Fonte: Elaborado pela autora com o auxílio de inteligência artificial (2026).

Esse parâmetro pode ser expresso pela Equação:

$$\beta = \frac{Ds}{De}$$

Onde:

β = razão de contração;

Ds = diâmetro de saída do bocal (m);

De = diâmetro de entrada do bocal (m).

Segundo a Equação da Continuidade, reduções na área de passagem tendem a provocar aumento da velocidade do escoamento, evidenciando a importância da relação entre os diâmetros na definição do comportamento do fluxo de ar (Munson, Young e Okiishi, 2004). Conforme demonstrado por diversos estudos experimentais e de simulação, a razão de contração constitui um dos parâmetros geométricos mais frequentemente investigados, por exercer influência direta sobre a aceleração do escoamento e sobre o desempenho aerodinâmico dos dispositivos tipo Eco-cooler.

Além da razão de contração, a forma geométrica dos bocais também exerce influência significativa sobre o comportamento do escoamento. Alterações bruscas na geometria podem provocar a separação da camada limite, favorecendo a formação de regiões de recirculação e turbulência, o que aumenta as perdas de carga e reduz a eficiência

do escoamento. Por outro lado, perfis com transições mais suaves tendem a manter o fluxo aderido às paredes do bocal por um maior percurso, proporcionando menor dissipação de energia e melhor aproveitamento do fluxo de ar (Pritchard, 2011; Munson, Young e Okiishi, 2004). Estudos recentes vêm investigando diferentes perfis geométricos, como bocais cilíndricos, cônicos, curvos e combinações entre essas configurações, buscando compreender como essas modificações influenciam a distribuição das linhas de corrente, as perdas de carga e o desempenho aerodinâmico dos dispositivos (Kasantikul, 2020; Pratiwi; Arifin, 2021; Bunker et al., 2024). Outro aspecto frequentemente investigado refere-se à quantidade de bocais, ao espaçamento entre eles e ao arranjo dos módulos. Essas características influenciam a distribuição do fluxo de ar ao longo da abertura da edificação e podem modificar o alcance da ventilação e a uniformidade das condições térmicas internas. Dessa forma, o desempenho do dispositivo depende não apenas do comportamento individual de cada bocal, mas também da forma como esses elementos são distribuídos no conjunto.

O ângulo de convergência também pode influenciar o comportamento aerodinâmico do sistema. Conforme discutido por Pritchard (2011), transições geométricas muito abruptas podem favorecer a ocorrência de separação do escoamento e perdas localizadas de energia, enquanto transições mais suaves tendem a proporcionar melhor direcionamento do fluxo. Assim, a geometria da região convergente constitui outro aspecto relevante no projeto desses dispositivos.

Kasantikul (2020), Bhanuprakash, Mummina e Mahesh Chakravarthi (2018) e Pratiwi e Attaufiq (2024) demonstram que alterações nesses parâmetros geométricos podem modificar significativamente o comportamento do escoamento e o desempenho dos dispositivos. Entretanto, apesar do reconhecimento de sua importância, a literatura ainda não estabelece uma configuração geométrica universalmente superior, uma vez que os resultados dependem das condições ambientais, da metodologia empregada e das características construtivas de cada estudo. Nesse contexto, torna-se necessária a análise sistemática das evidências disponíveis, visando identificar os parâmetros geométricos mais frequentemente associados ao melhor desempenho térmico e aerodinâmico dos dispositivos tipo Eco-cooler.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e natureza descritiva, desenvolvida com o objetivo de identificar e analisar os parâmetros geométricos investigados em dispositivos de resfriamento passivo do tipo Eco-cooler e sua influência sobre o desempenho térmico e aerodinâmico reportado na literatura científica. A revisão sistemática foi adotada por permitir a identificação, seleção, avaliação e síntese de evidências científicas de forma organizada e reprodutível.

3.1 PROTOCOLO DE PESQUISA

O levantamento bibliográfico foi realizado nas bases de dados *Google Scholar*, *Web of Science*, Scopus, SciELO e Portal de Periódicos CAPES, utilizando combinações de palavras-chave, tais como *eco-cooler*, *ecocooler*, *passive cooling device*, *passive air cooling*, *bottle cooling system*, *Venturi cooling device*, *passive cooling*, *Venturi effect cooling*. Optou-se pela utilização de termos em língua inglesa por se tratar do idioma predominante nas publicações científicas indexadas nas bases de dados consultadas, ampliando a recuperação de estudos potencialmente relevantes. A partir desses termos, foram elaboradas strings de busca utilizando operadores booleanos (AND e OR), de modo a maximizar a recuperação de estudos potencialmente relevantes. As estratégias utilizadas são apresentadas no Tabela 1.

A triangulação das estratégias foi feita manualmente. Após a realização das buscas nas diferentes bases de dados, os resultados obtidos foram comparados manualmente, com o objetivo de identificar os estudos que se repetiam entre as bases e aqueles exclusivos de determinada fonte. Posteriormente, todos os registros identificados foram submetidos aos mesmos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos para a revisão. Dessa forma, a triangulação das estratégias de busca permitiu verificar a sobreposição e a complementaridade dos resultados obtidos nas diferentes bases de dados, contribuindo para a identificação dos estudos relevantes para a pesquisa.

Tabela 1 - Estratégias de busca utilizadas na revisão

String	Objetivo da busca	Estratégia utilizada
String 1	Localizar estudos gerais relacionados ao Eco-cooler.	ecocooler OR eco-cooler
String 2	Identificar estudos que avaliem a redução de temperatura em Eco-coolers.	("eco-cooler" OR ecocooler) AND temperature
String 3	Identificar estudos focados na geometria dos dispositivos.	("eco-cooler" OR ecocooler) AND geometry
String 4	Identificar estudos relacionados ao efeito Venturi em Eco-coolers e sistemas de resfriamento passivo.	((("eco-cooler" OR ecocooler) AND Venturi) OR ("passive cooling" AND Venturi AND cooling))
String 5	Identificar estudos que relacionam Eco-coolers, geometria dos dispositivos e desempenho térmico.	("eco-cooler" OR "ecocooler" OR "passive cooling device") AND (geometry OR nozzle OR Venturi) AND ("thermal performance" OR cooling)

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Embora o contexto climático do semiárido e as condições de conforto térmico constituam a motivação para a aplicação do dispositivo investigado, o delineamento da busca foi inicialmente orientado pela identificação de estudos sobre o Eco-cooler e seus mecanismos de resfriamento passivo, priorizando termos relacionados ao dispositivo, ao efeito de Venturi e ao resfriamento do ar. Dessa forma, não foram utilizados, como termos obrigatórios das strings de busca, descritores específicos relacionados ao clima semiárido ou ao conforto térmico. Essa opção permitiu ampliar a recuperação de estudos sobre o funcionamento e a configuração geométrica dos dispositivos, independentemente da região de aplicação, possibilitando posteriormente analisar as condições climáticas e ambientais consideradas em cada estudo. Embora os trabalhos selecionados tenham sido desenvolvidos, em sua maioria, em países como Índia e Indonésia, cujas condições climáticas apresentam, em determinadas regiões, características de temperaturas elevadas e períodos de maior aridez, não foram identificados estudos especificamente voltados às condições climáticas do semiárido nordestino brasileiro. Assim, os resultados encontrados foram considerados como referências para a compreensão do desempenho e dos parâmetros geométricos dos dispositivos em ambientes de clima quente, sem pressupor equivalência direta com as condições climáticas do semiárido brasileiro.

Além da busca direta nas bases de dados, foi empregada a técnica de *snowballing*, por meio da análise das listas de referências dos artigos inicialmente selecionados. Os

estudos identificados por esse procedimento foram submetidos aos mesmos critérios de inclusão e exclusão adotados para os artigos obtidos através das buscas nas bases de dados, sendo incorporados à amostra final quando considerados pertinentes ao objetivo da pesquisa.

3.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

A seleção dos estudos foi conduzida a partir dos critérios de inclusão e exclusão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios de inclusão e exclusão dos estudos

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
Artigos científicos completos publicados entre 2010 e 2025.	Estudos sem acesso ao texto completo.
Estudos que abordem: - Eco-cooler; - dispositivos de resfriamento passivo baseados em garrafas PET; - sistemas de ventilação passiva utilizando efeito Venturi ou princípios semelhantes.	Trabalhos duplicados encontrados em mais de uma base de dados.
Estudos que apresentam pelo menos um dos seguintes aspectos: - análise geométrica dos bocais; - avaliação do desempenho térmico; - estudos experimentais, estudos baseados e Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) ou revisões da literatura relacionados ao tema.	Estudos que abordem ventilação ou resfriamento passivo sem relação com Eco-coolers ou sistemas equivalentes.
Artigos disponíveis em texto completo.	Estudos que não apresentam informações técnicas relacionadas à geometria, ao comportamento do escoamento, à ventilação natural ou ao desempenho térmico dos dispositivos.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Inicialmente, os artigos foram avaliados por meio da leitura dos títulos e resumos. Em seguida, os estudos potencialmente relevantes foram submetidos à leitura completa, sendo mantidos apenas aqueles que atenderam aos critérios estabelecidos.

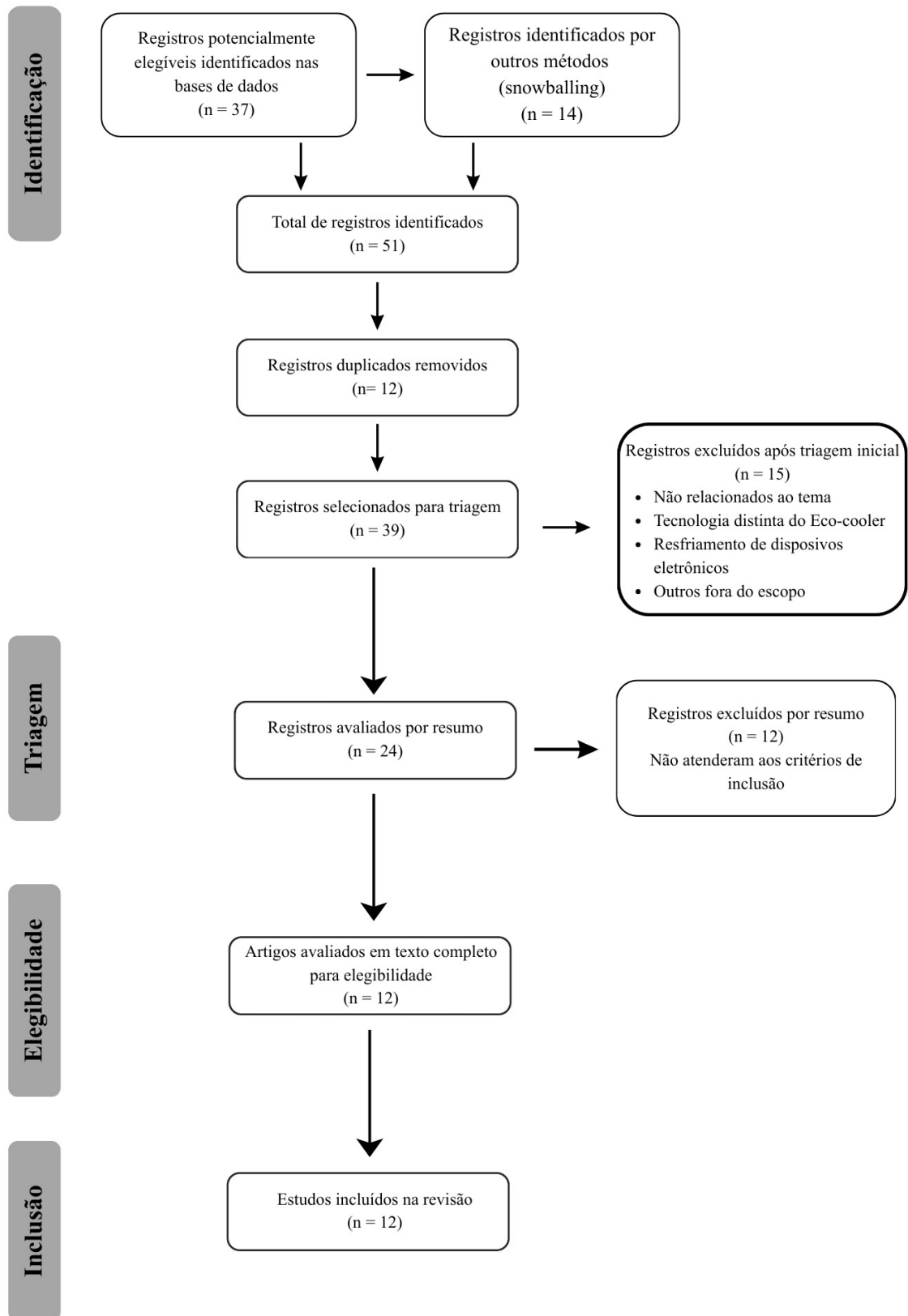
3.3 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

O processo de seleção dos artigos seguiu as recomendações do protocolo PRISMA, permitindo a documentação transparente das etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos.

As buscas foram realizadas entre os meses de maio e junho de 2026 nas bases *Google Scholar*, SciELO, Portal Periódicos CAPES, Scopus e *Web of Science* por meio das estratégias apresentadas anteriormente. No total, as buscas retornaram aproximadamente 512 registros, sendo 456 provenientes do Google Scholar, 37 da Scopus e 19 da *Web of Science*. Não foram identificados estudos nas bases SciELO e Portal de Periódicos CAPES. Ao analisar os resultados obtidos, observou-se que grande parte dos resultados correspondia a estudos repetidos, trabalhos sem relação direta com o tema investigado ou pesquisas voltadas a outras aplicações de resfriamento passivo. Além disso, verificou-se que a maioria dos registros recuperados na Scopus e na Web of Science correspondia a estudos já identificados no Google Scholar. Dessa forma, para evitar duplicidade e manter apenas um registro de cada publicação, foram considerados os registros únicos para as etapas subsequentes da seleção dos estudos.

Durante a etapa de identificação, foi realizada uma análise preliminar dos títulos dos estudos recuperados, sendo selecionados para download apenas os registros potencialmente relacionados ao tema da pesquisa e que possuíam acesso ao texto completo. Dessa forma, 37 artigos provenientes das bases de dados foram considerados para análise posterior. Adicionalmente, a aplicação da técnica de *snowballing*, realizada a partir das referências bibliográficas dos estudos inicialmente selecionados, permitiu a identificação de 14 registros adicionais, totalizando 51 estudos. A figura 7 apresenta o fluxograma correspondente ao processo de seleção dos estudos.

Figura 7 - Fluxograma de etapas consideradas na revisão sistemática



Fonte: Adaptado de PRISMA (2020).

Em seguida, foram identificados 12 estudos duplicados, resultando em 39 estudos para triagem. Após triagem inicial, foi utilizado o NotebookLM, ferramenta de inteligência artificial, utilizado exclusivamente como ferramenta de apoio à organização e análise preliminar dos estudos. A ferramenta foi empregada para identificar, de forma mais ágil, se os estudos tratavam de dispositivos do tipo Eco-cooler e se apresentavam informações relevantes para a pesquisa, como parâmetros geométricos dos bocais (dimensões, quantidade e configuração), além de resultados relacionados ao desempenho térmico, como diferenças de temperatura e comportamento do escoamento. As informações identificadas foram posteriormente verificadas e validadas por meio de leitura crítica dos artigos, não sendo a ferramenta utilizada para tomada de decisões metodológicas. Com base nessa etapa, seguida de verificação, 15 artigos foram excluídos por não apresentarem relação direta com o tema da pesquisa, abordarem tecnologias distintas do Eco-cooler, sistemas voltados apenas ao resfriamento de dispositivos eletrônicos ou outras soluções fora do escopo estabelecido.

Posteriormente, 24 estudos foram submetidos à avaliação dos resumos, etapa na qual 12 artigos foram excluídos após verificação, por não atenderem aos critérios de inclusão previamente definidos. Os 12 estudos restantes foram então analisados em texto completo para verificação de elegibilidade.

Após a leitura integral dos artigos, constatou-se que todos os estudos remanescentes atendiam aos critérios de inclusão estabelecidos para esta revisão. Dessa forma, ao final do processo de seleção, a amostra final foi composta por 12 artigos, que subsidiaram a análise dos resultados e as discussões apresentadas neste estudo.

3.4 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Após a seleção final dos estudos, foi realizada a extração sistemática das informações consideradas relevantes para a análise comparativa dos dispositivos, as quais foram registradas em planilha. Para cada artigo foram coletadas as seguintes informações: autor e ano de publicação, tipo de protótipo analisado, material utilizado, dados de geometria dos bocais (diâmetros de entrada e saída, comprimento, ângulo de convergência), número de bocais, arranjo geométrico utilizado, método de teste, condições de vento avaliadas, desempenho térmico ($\Delta T_{\text{máx}}$), principais resultados obtidos e principais limitações apontadas pelos autores.

Para garantir uniformidade na coleta das informações, os dados extraídos de cada

estudo foram inicialmente organizados em uma planilha padronizada e, posteriormente, sistematizados em tabelas comparativas contendo informações sobre características gerais dos estudos, geometrias investigadas, métodos empregados, condições de ensaio, desempenho térmico, limitações e demais variáveis relevantes para a pesquisa. Essa organização permitiu a comparação entre os estudos e subsidiou a análise descritiva e a síntese crítica das evidências apresentadas no Capítulo 4.

Considerando que parte dos estudos analisados não apresenta todas as características geométricas dos dispositivos avaliados, os dados ausentes foram registrados como Não Reportado (NR), nas tabelas de extração.

Essas lacunas foram consideradas durante a discussão dos resultados, sendo tratadas como limitações da literatura disponível e indicativas da necessidade de maior padronização metodológica em pesquisas futuras sobre dispositivos de resfriamento passivo do tipo Eco-cooler.

3.5 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos estudos foi realizada por meio de abordagem descritiva e comparativa. Inicialmente, foram apresentados os resultados do processo de busca e seleção dos artigos, indicando a quantidade de estudos identificados, excluídos e incluídos na revisão. Em seguida, os estudos selecionados foram comparados quanto às características geométricas dos dispositivos, incluindo material utilizado, dimensões dos bocais, quantidade e disposição dos elementos, condições de ensaio e desempenho térmico obtido.

Por fim, foi realizada uma síntese crítica das evidências disponíveis, buscando identificar os parâmetros geométricos mais frequentemente investigados, suas relações com o desempenho térmico e aerodinâmico dos dispositivos e as principais convergências, divergências e lacunas existentes na literatura científica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS SELECIONADOS

A revisão sistemática resultou na seleção de 12 estudos que atenderam aos critérios de inclusão previamente estabelecidos. Embora a estratégia de busca tenha abrangido o período de 2010 a 2025, não foram retornadas publicações elegíveis entre 2010 e 2017,

indicando que as pesquisas sobre o Eco-cooler são relativamente recentes. As publicações analisadas foram desenvolvidas entre 2018 e 2024, contemplando diferentes abordagens metodológicas, incluindo estudos experimentais, simulações computacionais por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e pesquisas de caráter aplicado. Observou-se predominância de investigações realizadas em países asiáticos, especialmente Índia e Indonésia, além de estudos desenvolvidos no Brasil, evidenciando o interesse pelo desenvolvimento de soluções passivas de resfriamento para regiões de clima quente.

Considerando o objetivo da revisão, a síntese dos estudos foi direcionada principalmente à identificação dos parâmetros geométricos associados ao desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler no resfriamento do ar. Embora as condições climáticas e ambientais dos experimentos tenham sido consideradas durante a extração dos dados, observou-se heterogeneidade entre os estudos quanto às condições de ensaio, aos ambientes avaliados e aos parâmetros utilizados para caracterizar o desempenho térmico. Além disso, nem todos os trabalhos apresentaram indicadores padronizados de conforto térmico, como temperatura operativa ou sensação térmica. Dessa forma, não foi realizada uma síntese comparativa específica de conforto térmico, uma vez que a disponibilidade e a forma de apresentação dessas informações não permitiriam uma comparação consistente entre os estudos. Assim, os resultados foram organizados prioritariamente em torno dos parâmetros geométricos dos dispositivos e de sua relação com a redução de temperatura e o desempenho do escoamento do ar, mantendo-se as condições climáticas como elementos de contextualização para a interpretação dos resultados.

Tabela 3 - Caracterização geral dos estudos

Autor (Ano)	País	Tipo de estudo	Método	Material/sistema
Bhanuprakash et al. (2018)	Índia	Experimental	Ensaaios com garrafas e protótipo em sala	Garrafas PET e papelão
Naveenkumar et al. (2018)	Índia	Simulação	Creo + ANSYS	Garrafas PET, folhas de thermocol e materiais de mudança de fase
Lima (2018)	Brasil	Experimental	Construção de protótipo, ensaios em laboratório e modelagem matemática	Garrafas PET, papelão, sensores (Arduino, termohigrômetro e anemômetro)
Kasantikul (2020)	Tailândia	Experimental + CFD	Ensaio real + CFD	Garrafas plásticas circulares e retangulares
Mendi et al. (2020)	Índia	Experimental	Ensaaios com sensores + ANSYS	Garrafas PET e madeira compensada
Pratiwi e Arifin (2021)	Indonésia	Experimental + CFD	Medição + ANSYS	Modelos de Eco-cooler com diferentes geometrias
Antonio et al. (2021)	Indonésia	Revisão Crítica	Revisão de literatura	Eco-cooler educacional
Andhare e Dhamankar (2022)	Índia	Simulação/Proposta aplicada	DesignBuilder + CFD	Habitação com estratégias passivas
Cardelli, Obata e Nazareth (2023)	Brasil	Simulação CFD	OpenFOAM / BlueCFD / Eddy3D	Condutores/funiculares inspirados no Eco-cooler
Hadi et al. (2023)	Indonésia	Simulação CFD	Autodesk CFD + CBE Berkeley edu	Eco-cooler em ventilação cruzada
Bunker et al. (2024)	Suécia	Experimental + Modelagem	Túnel de vento, câmara climática e modelo teórico	Garrafas plásticas em placa
Pratiwi e Attaufiq (2024)	Indonésia	Simulação CFD	ANSYS + CBE Thermal Comfort Tool	Eco-cooler comparado à janela

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 3, verifica-se que a maior parte das pesquisas empregou garrafas PET como material construtivo, devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e facilidade de montagem.

Em relação aos procedimentos metodológicos, observou-se predominância de pesquisas experimentais, estudos baseados em simulações por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e trabalhos que combinaram ambas as abordagens. Essa combinação de abordagens permitiu não apenas avaliar o desempenho térmico dos dispositivos, por meio da redução da temperatura e do aumento da velocidade do ar, mas também compreender o comportamento do escoamento no interior dos bocais, fornecendo subsídios para a otimização de diferentes configurações geométricas.

A análise do conjunto de estudos também evidencia uma evolução no enfoque das pesquisas ao longo dos anos. Enquanto os trabalhos iniciais evidenciam a viabilidade técnica do Eco-cooler como alternativa de baixo custo para melhoria do conforto térmico, as investigações mais recentes passaram a explorar aspectos específicos relacionados à geometria dos bocais, ao comportamento aerodinâmico do escoamento, à influência das condições ambientais e à aplicação de ferramentas de simulação computacional. Essa evolução demonstra o amadurecimento da temática e fornece uma base consistente para a análise comparativa dos parâmetros geométricos, apresentada a seguir.

4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Após a caracterização geral dos estudos selecionados, procedeu-se à análise comparativa dos parâmetros geométricos investigados nas pesquisas, buscando identificar quais características construtivas e operacionais exercem maior influência sobre o desempenho térmico dos dispositivos tipo Eco-cooler. A Tabela 4 apresenta uma síntese comparativa dos estudos incluídos nesta revisão, destacando a geometria investigada, os parâmetros analisados, as configurações que apresentaram melhor desempenho e os principais resultados obtidos por cada autor.

Tabela 4 - Síntese dos parâmetros investigados

Autor (Ano)	Geometria investigada	Parâmetro alterado	Melhor Configuração	Principal resultado
Bhanuprakash et al. (2018)	Garrafas com entrada de 2,75", 3" e 4", saída de 1"	Diâmetro de entrada / razão de contração	4" × 1"	Maior redução térmica; protótipo em sala reduziu média de 1,87 °C.
Naveenkumar et al. (2018)	Modelo baseado em garrafas PET	Análise por CFD	NR	Redução de 2,7 °C observada em simulação/análise.
Lima (2018)	Garrafa PET funcionando como bocal convergente	Diâmetro da saída do túnel de vento	Não comparou geometrias	Demonstrou que o aumento da velocidade do ar ocorre devido à redução da seção transversal, mas concluiu que o Eco-cooler não reduz a temperatura do ar por efeito Venturi, apenas aumenta a velocidade do escoamento.
Kasantikul (2020)	Eco-cooler circular e retangular; três tamanhos retangulares	Forma e tamanho do bocal	Tipo 2, com garrafas retangulares de 500 mL	Redução máxima de 3,66 °C; desempenho depende da velocidade do ar e tamanho do Eco-cooler.
Mendi et al. (2020)	Eco-cooler em janela e com auxílio de água	Vento, arranjo e apoio evaporativo	Eco-cooler associado à água	Eco-cooler isolado reduziu 0,9 °C; vento é determinante.
Pratiwi e Arifin (2021)	Modelos A, B e C; D1 = 20 cm e D2 = 10, 6,7 e 5 cm	Forma, razão D1/D2 e altura	Modelo C, D1 = 20 cm, D2 = 5 cm, altura 1 m	Maior alcance do vento: 2,77 m; velocidade mínima de 0,499 m/s.
Antonio et al. (2021)	Eco-cooler como solução educacional	Revisão crítica	Garrafa com 6 cm de diâmetro; painel 48 × 48	Redução estimada de 3 °C.
Andhare e Dhamankar (2022)	Eco-cooler como estratégia passiva complementar	Integração com envelope, ventilação e sombreamento	Não compara geometrias	Reduziu desconforto, temperatura e consumo energético no caso de projeto.
Cardelli, Obata e Nazareth (2023)	51 geometrias de condutos/funiculares	Curvatura, presença de caixa e forma	Curvatura interna	Curvatura interna apresentou maiores velocidades de saída; curvatura externa teve menor desempenho.
Hadi et al. (2023)	Eco-cooler 4" × 1" em abertura de 1 m ²	Aplicação em fachada/ventilação cruzada	Eco-cooler aumentou velocidade, mas com curto alcance	A velocidade aumentou de 3,60 para 5,20 m/s, porém não garantiu conforto térmico no ambiente.
Bunker et al. (2024)	Seis configurações de Eco-cooler	Tamanho, comprimento e arranjo	Não houve geometria efetiva universal	Redução máxima empírica ~0,20 °C; efeito de 0,85 °C não permaneceu além do bocal.
Pratiwi e Attaufiq (2024)	Eco-cooler comparado à janela	Tipo de abertura	Eco-cooler	Redução de 0,65 °C contra 0,35 °C da janela.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 4, observa-se que, embora todos os estudos tenham investigado dispositivos fundamentados nos mesmos princípios físicos de funcionamento — especialmente a Equação da Continuidade, a Equação de Bernoulli e o efeito Venturi —, as pesquisas diferem quanto aos objetivos, às variáveis analisadas, às metodologias empregadas e aos resultados obtidos. Enquanto alguns autores concentraram suas investigações na

otimização da geometria dos bocais, outros priorizaram a avaliação das condições ambientais de operação, a validação por meio de simulações computacionais ou a aplicação prática do Eco-cooler em diferentes tipologias de edificações.

Essa diversidade metodológica evidencia que o desempenho do dispositivo não depende exclusivamente de um único fator, mas da interação entre características geométricas, condições de operação e forma de aplicação. Dessa maneira, para facilitar a interpretação dos resultados e possibilitar uma comparação mais consistente entre os estudos, a discussão foi organizada em quatro eixos temáticos: (i) influência da razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída; (ii) influência da geometria do bocal; (iii) influência das condições ambientais de operação; e (iv) aplicações dos dispositivos tipo Eco-cooler em edificações. Essa abordagem permite identificar convergências, divergências e lacunas existentes na literatura, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos fatores que condicionam o desempenho desses dispositivos de resfriamento passivo.

4.2.1 Influência da razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída

Entre os parâmetros geométricos investigados na literatura, a razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída dos bocais destaca-se como um dos fatores mais recorrentes na busca pela otimização do desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler. Em razão de sua influência sobre o comportamento do escoamento, diferentes estudos avaliaram configurações geométricas distintas com o objetivo de identificar relações dimensionais capazes de potencializar o desempenho do dispositivo.

Tabela 5 - Comparação das configurações geométricas relacionadas à razão de contração dos dispositivos tipo Eco-cooler

Autor (Ano)	Entrada	Saída	Relação	Resultado
Bhanuprakash et al. (2018)	4"	1"	4:1	Melhor desempenho térmico entre os modelos.
Pratiwi e Arifin (2021)	20 cm	5 cm	4:1	Melhor alcance e maior velocidade mínima.
Hadi et al. (2023)	4"	1"	4:1	Aumentou velocidade, mas com alcance curto.
Bunker et al. (2024)	Variável	Variável	NR	Alterações geométricas não resultaram em resfriamento significativo.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 5, observa-se uma convergência entre os estudos de Bhanuprakash *et al.* (2018), Pratiwi e Arifin (2021) e Hadi *et al.* (2023) quanto à importância da razão de contração para o desempenho aerodinâmico dos dispositivos. Embora tenham empregado metodologias distintas, os três trabalhos indicam que o aumento da relação entre o diâmetro de entrada e o diâmetro de saída favorece a aceleração do escoamento do ar, corroborando os fundamentos teóricos apresentados no referencial deste estudo.

Bhanuprakash *et al.* (2018) compararam três configurações utilizando garrafas PET com diâmetros de entrada de 2,75", 3" e 4", mantendo constante o diâmetro de saída de 1". Nos ensaios preliminares, a configuração 4" × 1" apresentou o melhor desempenho entre os modelos avaliados, indicando que maiores razões de contração favorecem a aceleração do escoamento do ar. No entanto, em razão da indisponibilidade de quantidade suficiente de garrafas de 4", o protótipo instalado para avaliação em ambiente real foi confeccionado com garrafas de 3" × 1", obtendo uma redução média de 1,87 °C na temperatura interna ao longo do período de monitoramento. Esse resultado demonstra que, embora a configuração de maior diâmetro tenha apresentado melhor desempenho em condições controladas, limitações relacionadas à disponibilidade de materiais também podem influenciar a escolha da geometria empregada na aplicação prática.

Além disso, esse aspecto evidencia que a adoção da configuração geometricamente mais eficiente nem sempre é viável na prática, uma vez que fatores como disponibilidade de materiais, custo e facilidade de execução também influenciam a implementação do dispositivo. Assim, a escolha da geometria deve considerar não apenas o desempenho aerodinâmico, mas também sua viabilidade construtiva e aplicação em condições reais.

Resultados semelhantes aos de Bhanuprakash *et al.* (2018), foram obtidos por Pratiwi e Arifin (2021), que avaliaram diferentes relações geométricas entre os diâmetros dos bocais por meio de análises experimentais e simulações computacionais. Entre as configurações investigadas, o Modelo C, correspondente à relação de 20 cm para 5 cm (4:1), apresentou o melhor desempenho, alcançando maior propagação do fluxo de ar e velocidades superiores às demais configurações. Diferentemente de Bhanuprakash *et al.* (2018), cujo foco principal foi a redução da temperatura, esse estudo concentrou-se na caracterização aerodinâmica do escoamento, demonstrando que a otimização geométrica também influencia a distribuição espacial do fluxo de ar no ambiente.

A configuração de 4" × 1" também foi empregada por Hadi *et al.* (2023), que investigaram a aplicação do Eco-cooler em ambientes com ventilação cruzada. Os

resultados demonstraram aumento da velocidade do ar de 3,60 para 5,20 m/s após a instalação do dispositivo, confirmando o efeito da razão de contração sobre a aceleração do escoamento. Entretanto, os autores observaram que esse incremento não foi suficiente para proporcionar conforto térmico em todo o ambiente, evidenciando que o desempenho do Eco-cooler depende não apenas da geometria do bocal, mas também das condições de operação e da distribuição do fluxo de ar no espaço interno.

Embora os estudos anteriormente citados indiquem que maiores razões de contração favorecem o desempenho aerodinâmico dos dispositivos, os resultados de Lima (2018) e Bunker *et al.* (2024) introduzem uma discussão importante acerca da interpretação desse desempenho. Lima (2018) demonstrou experimentalmente que a redução da seção transversal promove aumento da velocidade do escoamento, conforme previsto pela Equação da Continuidade, mas argumenta que esse fenômeno não implica, necessariamente, redução da temperatura do ar decorrente do efeito Venturi. De maneira semelhante, Bunker *et al.* (2024) verificaram que, apesar do aumento da velocidade do ar em determinadas configurações geométricas, as reduções de temperatura observadas foram pequenas e restritas à região imediatamente após os bocais. Esses resultados sugerem que parte da melhoria percebida pelos usuários pode estar mais relacionada ao aumento da velocidade do ar e da sensação de conforto térmico do que ao efetivo resfriamento do ambiente.

De forma geral, os estudos analisados indicam que a razão de contração constitui um dos principais parâmetros geométricos associados ao desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler, especialmente por favorecer a aceleração do escoamento do ar. Entretanto, as evidências também demonstram que esse parâmetro, isoladamente, não garante maior eficiência térmica, uma vez que fatores como geometria do bocal, velocidade do vento incidente e condições ambientais exercem influência significativa sobre os resultados obtidos. Dessa forma, embora exista consenso quanto ao efeito da razão de contração sobre o comportamento aerodinâmico do fluxo, ainda não há consenso absoluto acerca da magnitude da redução de temperatura proporcionada pelo dispositivo.

4.2.2 Influência da geometria do bocal

Além da razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída, as pesquisas demonstram que a forma geométrica do bocal constitui outro fator relevante para o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler. Alterações no perfil do conduto modificam o comportamento do escoamento, influenciando a distribuição das linhas de corrente, a

formação de regiões de turbulência e as perdas de carga ao longo do dispositivo. Dessa forma, diferentes autores investigaram configurações geométricas alternativas com o objetivo de maximizar a velocidade do ar na saída dos bocais e, consequentemente, melhorar o desempenho do sistema.

Tabela 6 - Comparação das geometrias dos bocais investigadas nos estudos selecionados

Autor (Ano)	Geometrias avaliadas	Melhor Geometria	Resultado
Kasantikul (2020)	Circular × retangular	Retangular	Maior redução de temperatura, até 3,66 °C.
Pratiwi e Arifin (2021)	Modelos A, B e C	Modelo C	Maior alcance do fluxo de ar.
Cardelli, Obata e Nazareth (2023)	Cônicos, curvaturas internas, externas, shisha e complexos	Curvatura interna	Maior velocidade de saída.
Bunker et al. (2024)	Seis designs de garrafas	Sem superioridade clara	Efeito térmico desprezível na maior parte dos testes.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 6, observa-se que os estudos de Kasantikul (2020), Pratiwi e Arifin (2021), Cardelli, Obata e Nazareth (2023) e Bunker *et al.* (2024) investigaram diferentes configurações geométricas dos dispositivos, evidenciando que modificações na forma do bocal podem alterar significativamente o comportamento aerodinâmico do escoamento. Embora as geometrias avaliadas sejam distintas entre os estudos, todos buscaram identificar configurações capazes de reduzir perdas de carga e favorecer a aceleração do fluxo de ar.

Kasantikul (2020) comparou dispositivos confeccionados com garrafas de seção circular e retangular, avaliando ainda três diferentes dimensões para os modelos retangulares. Os resultados indicaram desempenho superior para o modelo retangular do Tipo 2, confeccionado com garrafas de 500 mL, que apresentou redução máxima de temperatura de 3,66 °C. Segundo a autora, além da geometria adotada, a eficiência do dispositivo também foi influenciada pela velocidade do vento incidente e pelas dimensões do conjunto instalado, demonstrando que pequenas modificações construtivas podem refletir diretamente no desempenho térmico do sistema.

Pratiwi e Arifin (2021) também investigaram a influência da geometria dos bocais por meio da comparação entre três configurações distintas (Modelos A, B e C), associadas a diferentes razões de contração e alturas de instalação. O Modelo C apresentou o melhor desempenho aerodinâmico, proporcionando maior alcance do fluxo de ar e velocidades superiores às observadas nas demais configurações. Diferentemente de Kasantikul (2020),

cujo foco principal foi a redução da temperatura, esse estudo concentrou-se na distribuição do escoamento no ambiente, demonstrando que a geometria do bocal influencia não apenas a intensidade, mas também o alcance da ventilação promovida pelo dispositivo.

Uma abordagem distinta foi apresentada por Cardelli, Obata e Nazareth (2023), que avaliaram 51 geometrias inspiradas no princípio do efeito Venturi por meio de simulações computacionais. Entre as configurações analisadas, os modelos com curvatura interna apresentaram as maiores velocidades de saída, enquanto aqueles com curvatura externa obtiveram os menores desempenhos. Os autores atribuíram esse comportamento à redução das perdas aerodinâmicas e à melhor condução das linhas de corrente ao longo do conduto, evidenciando que o desempenho do Eco-cooler pode ser aprimorado por meio da otimização do perfil geométrico do bocal, mesmo sem alterações significativas na razão de contração.

Entretanto, os resultados apresentados por Bunker *et al.* (2024) demonstram que a simples alteração da geometria não garante, por si só, melhorias expressivas no desempenho térmico do dispositivo. Ao comparar seis diferentes configurações de Eco-cooler, os autores verificaram que, embora determinadas geometrias tenham promovido aumento localizado da velocidade do ar, as reduções de temperatura observadas permaneceram inferiores a 1 °C e restritas às proximidades dos bocais. Esses resultados reforçam que a eficiência do dispositivo depende da interação entre geometria, condições ambientais e características da instalação, não sendo possível atribuir o desempenho exclusivamente ao formato do bocal.

De forma geral, os estudos analisados indicam que a geometria do bocal exerce influência significativa sobre o comportamento aerodinâmico do escoamento, podendo favorecer maior aceleração e melhor distribuição do fluxo de ar no ambiente. Entretanto, observa-se que não existe uma configuração geométrica universalmente superior, uma vez que o desempenho varia conforme o objetivo da investigação, as condições ambientais, a metodologia empregada e os critérios utilizados para avaliação. Assim, mais do que a adoção de um formato específico, os resultados sugerem que a otimização geométrica deve considerar simultaneamente aspectos aerodinâmicos, construtivos e operacionais, buscando maximizar a eficiência do dispositivo em condições reais de utilização.

4.2.3 Influência das condições ambientais no desempenho dos dispositivos

Embora os parâmetros geométricos exerçam influência significativa sobre o comportamento aerodinâmico dos dispositivos tipo Eco-cooler, os estudos analisados demonstram que o desempenho térmico também está diretamente condicionado às

características ambientais durante sua operação. Fatores como velocidade e direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa e condições climáticas locais podem potencializar ou limitar a eficiência do dispositivo, mesmo quando são empregadas geometrias consideradas adequadas. Dessa forma, a análise das condições ambientais torna-se indispensável para compreender as diferenças observadas entre os resultados experimentais reportados na literatura.

Tabela 7 - Influência das condições ambientais sobre o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler

Autor (Ano)	Vento	Temperatura	Umidade	Influência observada
Bhanuprakash et al. (2018)	10,5–16 km/h	≈30,8 °C nos ensaios	NR	Maior velocidade associada a maior diferença entre entrada e saída.
Lima (2018)	Utilizou túnel de vento com diferentes velocidades	Temperatura interna e externa monitoradas	Umidade monitorada	Observou que a temperatura interna acompanhou a temperatura ambiente, enquanto a velocidade do ar aumentou na saída do bocal.
Kasantikul (2020)	1–3 m/s	Ambiente real e CFD	NR	Maior velocidade aumentou a redução térmica.
Mendi et al. (2020)	0,2–0,5 m/s no teste inicial; 3,2 m/s no ensaio em janela	24–26,8 °C	NR	Maior vento melhorou a eficiência; sistema isolado reduziu pouco.
Bunker et al. (2024)	0,2; 2,0; 4,0 m/s	30, 35 e 40 °C	40, 60 e 70%	Mesmo variando clima e vento, a redução térmica foi pequena.
Pratiwi e Attaufiq (2024)	NR	27,7 °C externa	Clima quente úmido	Eco-cooler reduziu mais que janela comum.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 7, a velocidade do vento foi o fator ambiental mais frequentemente associado ao desempenho dos dispositivos. Independentemente da configuração geométrica empregada, todos os estudos que analisaram essa variável indicaram que o aumento da velocidade do vento incidente favorece a aceleração do escoamento através dos bocais, potencializando a ventilação proporcionada pelo Eco-cooler. Entretanto, também se observou que a intensidade desse efeito varia conforme as condições climáticas e as características do ambiente analisado.

Mendi *et al.* (2020) verificaram que o Eco-cooler apresentou redução térmica limitada quando utilizado isoladamente, registrando aproximadamente 0,9 °C de redução da temperatura. No entanto, quando associado a um sistema complementar baseado em evaporação, o desempenho do conjunto foi significativamente ampliado. Os autores destacam que a velocidade natural do vento exerceu papel determinante na eficiência do dispositivo, evidenciando que o Eco-cooler apresenta melhor desempenho quando integrado a outras estratégias passivas de condicionamento ambiental.

Resultados semelhantes foram observados por Kasantikul (2020), que avaliou o

comportamento do dispositivo em diferentes velocidades de vento por meio de ensaios experimentais e simulações computacionais. O autor verificou que o desempenho do Eco-cooler aumentou progressivamente com a elevação da velocidade do ar incidente, alcançando redução máxima de 3,66 °C para a configuração mais eficiente. Esses resultados demonstram que a geometria do dispositivo atua em conjunto com as condições ambientais, não sendo possível dissociar completamente esses fatores durante a análise do desempenho.

Hadi *et al.* (2023) também evidenciaram a importância das condições ambientais ao analisar o Eco-cooler em um ambiente com ventilação cruzada. Embora tenha sido observado aumento da velocidade do ar de 3,60 para 5,20 m/s, os autores observaram que a distribuição do fluxo de ar, a posição do dispositivo e as características da ventilação natural da edificação influenciaram diretamente a eficiência do sistema, indicando que o aumento da velocidade do escoamento não se traduz, necessariamente, em melhoria uniforme das condições térmicas internas.

Os resultados obtidos por Bunker *et al.* (2024) reforçam essa interpretação. Ao avaliar diferentes combinações de temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa, os autores verificaram que, mesmo sob condições favoráveis de escoamento, as reduções de temperatura permaneceram inferiores a 1 °C na maior parte dos ensaios. Além disso, observaram que o efeito térmico positivo se concentrou nas proximidades dos bocais, dissipando-se rapidamente ao longo do ambiente. Esses achados sugerem que a eficiência do Eco-cooler depende fortemente das condições climáticas locais, especialmente da disponibilidade de ventilação natural, aspecto frequentemente negligenciado em estudos que analisam apenas a geometria dos dispositivos.

Além da velocidade do vento, outros fatores ambientais também foram considerados nos estudos analisados. Temperatura do ar, umidade relativa e características climáticas regionais influenciaram diretamente os resultados obtidos, dificultando a comparação entre pesquisas realizadas em diferentes localidades. Essa heterogeneidade metodológica constitui uma das principais limitações identificadas na literatura, uma vez que muitos estudos empregam condições experimentais específicas que não representam, necessariamente, os cenários encontrados em aplicações reais.

De forma geral, as evidências reunidas nesta revisão indicam que o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler resulta da interação entre parâmetros geométricos e condições ambientais. Embora a otimização da geometria possa favorecer o aumento da velocidade do escoamento, sua eficiência prática depende da disponibilidade de vento, das características climáticas locais e da forma de instalação do dispositivo. Assim, a literatura demonstra que

o sucesso da aplicação do Eco-cooler está relacionado não apenas ao projeto do bocal, mas também à adequação do sistema às condições ambientais do local onde será implantado.

4.2.4 Aplicações dos dispositivos tipo Eco-cooler em edificações

Além da investigação dos parâmetros geométricos e das condições ambientais que influenciam o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler, parte da literatura analisada concentrou-se na avaliação de sua aplicação em diferentes tipologias de edificações. Esses estudos buscaram verificar a viabilidade do dispositivo como estratégia passiva de ventilação e melhoria do conforto térmico, considerando aspectos como custo de implantação, facilidade construtiva, disponibilidade de materiais e adequação às condições climáticas locais.

Tabela 8 - Aplicações dos dispositivos tipo Eco-cooler em edificações

Autor (Ano)	Aplicação	Resultado prático
Bhanuprakash et al. (2018)	Sala de aula	Redução média de 1,87 °C em 14 dias.
Kasantikul (2020)	Sala real de 4,2 × 3,1 × 3,3 m	Redução de 1 a 3 °C; máximo de 3,66 °C.
Mendi et al. (2020)	Janela de ambiente interno	Baixa redução isolada; melhor com água e vento.
Antonio et al. (2021)	Uso educacional	Apresenta o Eco-cooler como alternativa sem eletricidade e de baixo custo.
Andhare e Dhamankar (2022)	Habitação temporária para trabalhadores	Eco-cooler associado a estratégias passivas de ventilação e sombreamento.
Hadi et al. (2023)	Aula/ambiente escolar com ventilação cruzada	Aumentou velocidade, mas não alcançou conforto térmico
Pratiwi e Attaufiq (2024)	Ambiente em clima quente úmido	Eco-cooler reduziu 0,65 °C, melhor que janela.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 8, observa-se que os dispositivos tipo Eco-cooler foram empregados em diferentes contextos, incluindo salas de aula, habitações temporárias, ambientes residenciais e estudos com finalidade didática. Apesar das diferenças entre os cenários avaliados, os trabalhos convergem quanto ao potencial da tecnologia como alternativa passiva de baixo custo para melhoria das condições de ventilação natural, especialmente em regiões de clima quente e com limitações de acesso a sistemas

convencionais de climatização.

Bhanuprakash *et al.* (2018) avaliaram a aplicação do Eco-cooler em uma sala de aula, registrando redução média de 1,87 °C durante o período de monitoramento. Embora os autores tenham identificado limitações relacionadas à disponibilidade de materiais para construção do protótipo ideal, os resultados demonstraram a viabilidade do dispositivo como solução de baixo custo para ambientes naturalmente ventilados. De forma semelhante, Hadi *et al.* (2023) analisaram a utilização do Eco-cooler em um ambiente escolar com ventilação cruzada, verificando aumento da velocidade do ar no interior da edificação. Entretanto, diferentemente de Bhanuprakash *et al.* (2018), concluíram que esse incremento não foi suficiente para garantir conforto térmico uniforme em todo o ambiente, evidenciando que o desempenho também depende da configuração arquitetônica e das condições de ventilação existentes.

A aplicação do Eco-cooler também foi investigada em edificações destinadas à habitação. Andhare e Dhamankar (2022) incorporaram o dispositivo ao projeto de uma habitação temporária para trabalhadores da construção civil, associando-o a estratégias complementares de ventilação natural, sombreamento e adequação da envoltória da edificação. Os autores concluíram que a integração dessas soluções contribuiu para reduzir o consumo energético e melhorar as condições de conforto térmico, reforçando que o Eco-cooler apresenta melhores resultados quando empregado em conjunto com outras estratégias passivas de condicionamento ambiental.

Essa abordagem integrada também é corroborada por Mendi *et al.* (2020), que observaram desempenho significativamente superior quando o Eco-cooler foi associado a um sistema complementar baseado em resfriamento evaporativo. Em conjunto, esses estudos indicam que a utilização isolada do dispositivo pode não ser suficiente para atender às demandas de conforto térmico em determinadas condições climáticas, sendo recomendável sua associação a outras estratégias bioclimáticas compatíveis com o contexto de aplicação.

Uma perspectiva distinta foi apresentada por Lima (2018) e Antonio *et al.* (2021), que utilizaram o Eco-cooler como ferramenta de caráter didático e de divulgação científica. Enquanto Lima (2018) explorou o dispositivo para demonstrar conceitos relacionados à Mecânica dos Fluidos, à Matemática e à instrumentação experimental, Antonio *et al.* (2021) destacou seu potencial como recurso educacional para o ensino de tecnologias sustentáveis e soluções de baixo custo voltadas à melhoria das condições ambientais. Embora esses estudos não tenham como foco principal a otimização geométrica ou a avaliação do

desempenho térmico, ambos evidenciam a simplicidade construtiva do dispositivo e sua relevância como instrumento de educação ambiental e tecnológica.

De forma geral, os estudos analisados demonstram que o Eco-cooler apresenta potencial para aplicação em diferentes tipologias de edificações, sobretudo em regiões de clima quente e em contextos caracterizados por restrições econômicas e elevado consumo energético associado ao condicionamento artificial do ar. Entretanto, as evidências também indicam que seu desempenho depende da adequada integração entre geometria do dispositivo, condições ambientais e características construtivas da edificação. Dessa forma, o Eco-cooler deve ser compreendido como uma estratégia complementar de resfriamento passivo, cuja eficiência pode ser potencializada quando associada a outras soluções bioclimáticas.

4.3 SÍNTESE DAS EVIDÊNCIAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

A análise conjunta dos estudos selecionados permitiu identificar padrões consistentes quanto aos fatores que influenciam o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler. Embora as pesquisas apresentem diferenças metodológicas relacionadas às condições experimentais, às configurações geométricas avaliadas e às variáveis analisadas, foi possível observar convergências importantes acerca dos mecanismos responsáveis pelo funcionamento desses dispositivos. A Tabela 9 sintetiza as principais evidências identificadas na literatura, destacando os aspectos mais recorrentes, os estudos que os abordaram e as interpretações obtidas a partir da análise comparativa dos resultados.

Tabela 9 - Síntese das evidências encontradas na literatura sobre os fatores que influenciam o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler

Aspecto analisado	Evidências encontradas	Estudos que abordam	Síntese crítica
Razão de contração (Entrada/Saída)	Relações de contração mais elevadas favoreceram o aumento da velocidade do ar e apresentaram melhor desempenho aerodinâmico.	Bhanuprakash et al. (2018); Pratiwi e Arifin (2021); Hadi et al. (2023)	Há forte consenso de que a razão de contração é um dos principais parâmetros geométricos responsáveis pela aceleração do escoamento.
Forma geométrica do bocal	Geometrias retangulares, modelos com curvatura interna e bocais otimizados apresentaram desempenho superior em relação às geometrias convencionais.	Kasantikul (2020); Cardelli et al. (2023); Pratiwi e Arifin (2021)	A forma do bocal influencia significativamente a distribuição e a velocidade do fluxo de ar, podendo potencializar o efeito Venturi.
Velocidade do vento incidente	O desempenho do Eco-cooler depende diretamente da velocidade do vento disponível. Em baixas velocidades, a eficiência tende a ser reduzida.	Mendi et al. (2020); Kasantikul (2020); Hadi et al. (2023); Bunker et al. (2024)	É o fator externo mais determinante para o funcionamento do dispositivo, podendo limitar sua aplicação em locais com baixa ventilação natural.
Redução da temperatura do ar	Foram observadas reduções variando de aproximadamente 0,2 °C a 3,66 °C, dependendo das condições experimentais e da configuração adotada.	Todos os estudos experimentais	Não existe consenso sobre um valor único de redução térmica, uma vez que os resultados dependem das condições climáticas, da geometria e da metodologia empregada.
Velocidade do ar e conforto térmico	Todos os estudos observaram aumento da velocidade do ar, mesmo quando a redução da temperatura foi pequena.	Lima (2018); Hadi et al. (2023); Bunker et al. (2024); Mendi et al. (2020)	As evidências indicam que o principal benefício do Eco-cooler pode estar relacionado ao aumento da ventilação e à melhoria da sensação térmica, e não necessariamente ao resfriamento do ar.
Material construtivo	A maioria dos estudos utilizou garrafas PET, enquanto alguns avaliaram materiais alternativos ou geometrias distintas.	Maioria dos estudos	O material apresentou menor influência sobre o desempenho quando comparado à geometria do bocal e às condições ambientais.
Aplicação em edificações	O Eco-cooler mostrou potencial como estratégia passiva de baixo custo para edificações, especialmente em regiões de clima quente.	Antonio et al. (2021); Andhare e Dhamankar (2022); Lima (2018); Hadi et al. (2023)	O dispositivo apresenta potencial para melhorar a ventilação natural, porém seu desempenho depende das condições climáticas locais e do adequado dimensionamento da instalação.
Lacunas identificadas	Poucos estudos avaliaram simultaneamente todos os parâmetros geométricos ou utilizaram metodologias padronizadas.	Síntese da revisão	A ausência de padronização dificulta a comparação direta entre os resultados e evidencia a necessidade de pesquisas que integrem análises experimentais e numéricas sob condições controladas.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme apresentado na Tabela 9, a razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída destacou-se como o parâmetro geométrico mais frequentemente associado ao aumento da velocidade do ar no interior dos dispositivos. Os estudos de Bhanuprakash *et al.* (2018), Pratiwi e Arifin (2021) e Hadi *et al.* (2023) demonstraram que relações de contração mais elevadas favorecem a aceleração do escoamento, comprovando os princípios da Equação da Continuidade e da Equação de Bernoulli. Entretanto, as evidências também indicam que o aumento da velocidade do ar não resulta, necessariamente, em reduções proporcionais da temperatura ambiente, aspecto discutido por Lima (2018) e reforçado experimentalmente por Bunker *et al.* (2024).

Outro aspecto recorrente refere-se à influência da geometria do bocal sobre o comportamento aerodinâmico do escoamento. Os estudos de Cardelli, Obata e Nazareth (2023), Kasantikul (2020) e Pratiwi e Arifin (2021) evidenciaram que modificações no perfil geométrico dos bocais alteram a distribuição das linhas de corrente e a velocidade do fluxo

de ar, indicando que a otimização do formato do dispositivo pode contribuir para melhorar seu desempenho. Contudo, os resultados também demonstram que não existe uma configuração geométrica universalmente superior, uma vez que o desempenho varia conforme o objetivo da investigação e as condições de operação adotadas.

A análise comparativa também evidenciou que fatores ambientais exercem influência decisiva sobre a eficiência do Eco-cooler. Velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa e características climáticas locais foram apontadas como variáveis capazes de potencializar ou limitar o desempenho dos dispositivos, mesmo quando empregadas configurações geométricas consideradas adequadas. Nesse sentido, observa-se que a eficiência do Eco-cooler resulta da interação entre fatores geométricos e ambientais, não podendo ser atribuída exclusivamente ao desenho do bocal.

Por fim, verificou-se que os dispositivos tipo Eco-cooler apresentam potencial para aplicação em edificações localizadas em regiões de clima quente, especialmente quando utilizados como estratégia complementar de resfriamento passivo. Entretanto, os estudos analisados indicam que sua eficiência depende da integração entre projeto geométrico, condições ambientais e características construtivas da edificação. Dessa forma, recomenda-se que futuras pesquisas busquem padronizar metodologias experimentais, ampliar a investigação sobre diferentes configurações geométricas e avaliar o desempenho dos dispositivos em condições reais de uso, contribuindo para consolidar o conhecimento científico acerca dessa tecnologia.

De modo geral, esta revisão sistemática demonstra que o desempenho dos dispositivos tipo Eco-cooler não pode ser explicado por um único parâmetro isoladamente. Embora a razão de contração e a geometria do bocal exerçam influência significativa sobre o comportamento do escoamento, as evidências indicam que a efetividade do dispositivo depende da interação entre fatores geométricos, ambientais e construtivos. Assim, mais do que identificar uma configuração considerada ideal, os estudos analisados ressaltam a necessidade de adaptar o projeto do Eco-cooler às condições climáticas e às características específicas de cada aplicação, permitindo que a tecnologia seja empregada de forma mais eficiente e compatível com os princípios do resfriamento passivo.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo identificar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, os principais parâmetros geométricos investigados em dispositivos tipo Eco-cooler e analisar sua influência sobre o desempenho térmico e aerodinâmico. Considera-se que esse objetivo foi alcançado, uma vez que a revisão permitiu reunir, sistematizar e comparar evidências provenientes de estudos experimentais, simulações por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e pesquisas aplicadas, possibilitando identificar os principais parâmetros geométricos investigados e sua relação com o comportamento do escoamento e o desempenho térmico dos dispositivos. A análise contemplou estudos publicados entre 2018 e 2024 e permitiu caracterizar diferentes configurações e condições de operação presentes na literatura.

Os resultados demonstraram que a geometria dos dispositivos exerce papel fundamental no comportamento do escoamento do ar. Entre os parâmetros analisados, a razão de contração entre os diâmetros de entrada e saída destacou-se como um dos fatores mais relevantes para o aumento da velocidade do fluxo, corroborando os princípios da Equação da Continuidade e da Equação de Bernoulli. Além disso, verificou-se que modificações na geometria dos bocais podem contribuir para melhorar a distribuição do escoamento e reduzir perdas aerodinâmicas, evidenciando que o desempenho do Eco-cooler depende da adequada combinação entre diferentes características construtivas.

Entretanto, a revisão também evidenciou que a eficiência dos dispositivos não pode ser atribuída exclusivamente aos parâmetros geométricos. Fatores ambientais, como velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa e características da edificação, mostraram-se determinantes para o desempenho observado em condições reais de operação. Nesse sentido, verificou-se que geometrias semelhantes podem apresentar resultados distintos quando submetidas a diferentes condições climáticas, reforçando a necessidade de considerar simultaneamente aspectos geométricos, ambientais e construtivos no desenvolvimento de soluções de resfriamento passivo.

Um aspecto importante identificado pela revisão foi a assimetria entre o contexto que motivou esta pesquisa e o enfoque predominante da literatura encontrada. Embora a introdução deste trabalho tenha sido fundamentada na necessidade de melhoria do conforto térmico em edificações submetidas às condições climáticas do semiárido, os estudos selecionados concentraram-se principalmente na investigação de aspectos geométricos, aerodinâmicos e de desempenho do escoamento. Além disso, foram identificados poucos

estudos que avaliam diretamente a aplicação de dispositivos tipo Eco-cooler para a melhoria do conforto térmico em edificações localizadas em regiões semiáridas, especialmente no contexto brasileiro. Essa característica da literatura revisada explica a maior ênfase dada, nesta pesquisa, à análise dos parâmetros geométricos e aerodinâmicos dos dispositivos, ao mesmo tempo em que evidencia uma lacuna relevante a ser explorada por pesquisas futuras.

Outro aspecto relevante identificado foi a ausência de padronização metodológica entre os estudos analisados. Diferenças nos protocolos experimentais, nas condições de ensaio, na instrumentação empregada e nos parâmetros avaliados dificultam a comparação direta entre os resultados disponíveis na literatura. Também se observou a predominância de avaliações realizadas em condições específicas de laboratório ou em períodos de curta duração, sendo ainda reduzido o número de pesquisas que investigam o comportamento dos dispositivos em edificações reais e sob diferentes condições climáticas.

Diante desse cenário, conclui-se que os dispositivos tipo Eco-cooler apresentam potencial como estratégia de resfriamento passivo de baixo custo, sobretudo em localidades caracterizadas por elevadas temperaturas e limitações de acesso a sistemas convencionais de climatização. Contudo, não foi possível estabelecer uma configuração geométrica universalmente superior para todas as situações de uso. Os resultados indicam que a eficiência dos dispositivos tipo Eco-cooler depende da interação entre projeto geométrico, condições ambientais e características construtivas do ambiente de aplicação. Assim, o dimensionamento desses dispositivos deve considerar as particularidades climáticas e construtivas do local onde serão implantados, evitando a generalização de resultados obtidos sob condições experimentais específicas.

A principal contribuição científica desta revisão consiste na sistematização das evidências disponíveis acerca da relação entre os parâmetros geométricos e o desempenho térmico e aerodinâmico de dispositivos tipo Eco-cooler. Ao reunir e comparar os diferentes parâmetros investigados, as configurações adotadas, as condições de ensaio e os resultados reportados, o estudo contribui para organizar um conhecimento que se encontra disperso na literatura e para evidenciar tanto os parâmetros mais frequentemente investigados quanto as limitações que dificultam a comparação entre os estudos. Além disso, a identificação da escassez de pesquisas voltadas à aplicação desses dispositivos para melhoria do conforto térmico em regiões semiáridas constitui uma contribuição para o direcionamento de novas investigações.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se o desenvolvimento de estudos experimentais e computacionais que avaliem, de forma integrada, os parâmetros

geométricos mais promissores identificados na literatura e sua aplicação em condições climáticas representativas do semiárido brasileiro. Recomenda-se, particularmente, a realização de pesquisas nacionais e internacionais que investiguem o uso de dispositivos tipo Eco-cooler com foco na melhoria do conforto térmico em edificações situadas em regiões semiáridas, considerando variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, características construtivas e condições de ventilação. Também são necessários estudos em edificações reais e com protocolos experimentais padronizados, de modo a permitir comparações mais consistentes entre diferentes configurações geométricas e condições de operação.

As evidências obtidas nesta revisão fornecem, ainda, uma base técnica para o desenvolvimento das próximas etapas do projeto EcoVentus, especialmente no que se refere à definição dos parâmetros geométricos, ao planejamento dos ensaios experimentais e à construção e avaliação do protótipo. Nesse sentido, a pesquisa contribui para aproximar o conhecimento produzido na literatura das demandas relacionadas ao desempenho de soluções passivas de resfriamento aplicáveis ao contexto do semiárido brasileiro, reforçando o potencial da Engenharia Civil no desenvolvimento de alternativas de baixo consumo energético e socialmente acessíveis para a melhoria das condições térmicas das edificações.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE standard 55-2020**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2020.

ANDHARE, Sayali; DHAMANKAR, Namrata. Evaluating indoor environmental quality of onsite construction workers housing in Pune, India through performance-based simulation. **In: BUILDING SIMULATION AND OPTIMISATION VIRTUAL CONFERENCE, 6., 2022**, Bath. Proceedings [...]. Bath: University of Bath, 2022.

ANGUETH, Larissa; SALES, Gustavo de Luna. **Ventilação natural: estratégia de conforto térmico e eficiência energética para uma edificação residencial multifamiliar em Formosa (GO)**. *Paranoá*, Brasília, v. 17, e44797, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18830/1679-09442024v17e44797>.

ANTONIO, Alvito; HASANAH, Maulidah; DAMAYANTI, Novita; DEVINA, Oryza Aprilia; KHOERUNNISA, Fitri; WINARNO, Nanang. Eco Cooler for Cooler House without Electricity for Educational Purposes. **Indonesian Journal of Multidiciplinary Research**, v. 1, n. 1, p. 55–58, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401-2: instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários – parte 2: parâmetros de conforto térmico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BEZERRA, Paula; CRUZ, Talita; MAZZONE, Antonella; LUCENA, André F. P.; DE CIAN, Enrica; SCHAEFFER, Roberto. The multidimensionality of energy poverty in Brazil: A historical analysis. **Energy Policy**, [S. l.], v. 171, 113268, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113268>.

BHANUPRAKASH, Ch.; MUMMINA, Vinod; CHAKRAVARTHI V., Mahesh. Performance Evaluation of an Eco-Cooler analysed by varying the Physical and flow Parameters. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 377, p. 012024, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012024>.

BUNKER, Aditi; LUNDGREN KOWNACKI, Karin; SARKER, Sudipa; BARI, Rahmatul; SARKER, Malabika; BUONOCORE, Jonathan J.; GELDSETZER, Pascal; REVSTEDT, Johan; BÄRNIGHAUSEN, Till. **Evaluating the effectiveness of the ‘ecocooler’ for passive home cooling**. [S. l.]: Springer Nature, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s44168-024-00165-7>. Acesso em: 20 de junho de 2026.

CACCIA, Lara Schmitt; EVERS, Henrique; FERNANDES, Camila Schlatter; BETTI, Luana Priscila. **Sustentabilidade em habitação de interesse social: benefícios e custos de medidas para eficiência no consumo de água e energia**. 1. ed. Porto Alegre: WRI Brasil, 2017.

CAMARGO, José Rui. Evaporative cooling: water for thermal comfort. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 3, n. 2, p. 51-61, 2008.

CARDELLI, Anny; OBATA, Sasquia Hizuru; NAZARETH, Samuel. Eficiência geométrica de elementos vazados na aceleração do fluxo de ar para ventilação natural. In: **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC)**, 18.; **ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC)**, 14., 2023. *Ambiente construído e usuário: perspectivas latino-americanas*. Anais [...]. 2023.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2022**. Belo Horizonte: FJP, 2023.

GRUPO DE TRABALHO DA SOCIEDADE CIVIL PARA A AGENDA 2030. ODS. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/ods/>. Acesso em: 13 ago. 2026.

HADI, Dwiwangga Sang Nalendra; SUPRIYANTA; WIBOWO, Muhammad Fahd Reyhan. Efektivitas penghawaan alami dalam kenyamanan termal: intervensi fasad dan teknologi eco-cooler pada ruang aula. **Sinektika Jurnal Arsitektur**, v. 20, n. 1, p. 7-14, jan. 2023.

IDEASS. **The Zero Electricity Air-Cooler Created in Bangladesh**. Roma: IDEASS – Innovation for Development and South-South Cooperation, 2016. Disponível em: <https://www.ideassonline.org/public/pdf/EcoCoolerBangladesh-ENG.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2026.

KASANTIKUL, Benya. Eco-cooler Analysis for Room Temperature Reduction. **Mahasarakham International Journal of Engineering Technology**, Thailand, p. 69–75, 2020.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2014. 366 p.

LBN ANÁLISES. **Eco-cooler: faça seu próprio ar-condicionado com materiais recicláveis**. São Paulo, 22 nov. 2016. Disponível em: LBN Análises – Eco-cooler: faça seu próprio ar-condicionado com materiais recicláveis. Acesso em: 2 de julho de 2026.

LIMA, Heronilza Silva. **Conexão entre a matemática e a física**: a interdisciplinaridade explicando o funcionamento de um arrefecedor caseiro, o eco cooler. 2018. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Matemática) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, 2018.

MENDES, Mateus Veras; CÂNDIDO, Luis Felipe. **Desempenho térmico de habitações de interesse social: um estudo no semiárido nordestino**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), 18., 2020.

MENDI, Vikas; KUMAR, Anvit; YADAV, Bhavani Singh; VERMA, Divyanshu; ANKIT, R. J. **Use of eco-coolers in indoor cooling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1006, n. 1, p. 012005, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/1006/1/012005.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

NAVEENKUMAR, P.; RAGURAMAN, K.; RAJESH KUMAR, S.; KRISHNARAJ, M. Design and analysis of eco cooler. **World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 384-390, 2018. Disponível em: <http://www.wwjmr.com>. Acesso em: 2 de julho de 2026.

PLASTICS THE MAG. **Eco-cooler: An eco-friendly air conditioner made of plastic bottles that does not use electricity**. 2018 Disponível em: <https://plastics-themag.com/Eco-cooler:-An-eco-friendly-air-conditioner-made-of-plastic-bottles-that-does-not-use-electricity>. Acesso em: 22 de junho de 2026.

PRATIWI, Niniek; ARIFIN, Sri Sutarni. **Analisis Performa Model Eco-Cooler sebagai Alternative Bukaam Alami. Nature: National Academic Journal of Architecture**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24252/nature.v8i1a1>.

PRATIWI, Niniek; ATTAUFIQ, Muhammad Muhdi. Comparative Analysis of Performance Between Window and Eco-Cooler to Achieve Thermal Comfort in Hot Humid Climate. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 1361, p. 012006, 2024. DOI: 10.1088/1755-1315/1361/1/012006.

PRITCHARD, Philip J. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

SACHT, Helenice Maria; ROSSIGNOLO, João Adriano. Habitações térreas e multipavimentos de interesse social: avaliação de desempenho térmico para tipologias com vedações em alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 1, n. 4, 2009.

SANTAMOURIS, Matheos. Passive cooling of buildings. In: INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY. **Advances of Solar Energy**. London: James and James Science Publishers, 2005. p. 3–39.

SILVA, Naila Tainá da. **Estratégias Passivas de Conforto Térmico no Semiárido Nordeste: Uma Análise Sistemática de Literatura**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2025.

SZOKOLAY, Steven V. **Introduction to architectural science: the basis of sustainable design**. Oxford: Architectural Press, 2008.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Patos - Código INEP: 25281925
	Br 110, S/N, Alto da Tubiba, CEP 58700-000, Patos (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0006-80 - Telefone: None

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC

Assunto:	TCC
Assinado por:	Angelina Arcoverde
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Angelina Eryka Fernandes Arcoverde, DISCENTE (202216550045) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - PATOS**, em 14/08/2026 12:03:24.

Este documento foi armazenado no SUAP em 14/08/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1951259
Código de Autenticação: a006323ab6

